

# **Автоматизация сварочных комплексов на основе пушек с плазменным катодом: визуализация поверхности и наведение электронного пучка на стык обработкой сигнала отраженных электронов**

*С. Ю. Корнилов, Н. Г. Ремпе, А. А. Светлаков, Ю. Б. Шаропин*

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники  
634050 Россия, Томск  
e-mail: Kornilovsky@gmail.com, remnik77@gmail.com

Разработано устройство на основе пушки с плазменным катодом, позволяющее визуализировать поверхность свариваемого изделия, автоматически позиционировать электронный луч на сварном шве и вести луч по заранее определенным координатам шва. Устройство представляет собой программно-аппаратный комплекс, обрабатывающий сигнал с секционированного коллектора отраженных электронов. Сигнал на коллекторе формируется при сканировании свариваемых деталей электронным лучом с малой мощностью. Разработанное устройство позволяет получать картину поверхности изделия с разрешением 1024x1024 dpi и наводить электронный луч на сварной шов с точностью порядка 50 мкм.

## **Введение**

Пушки с плазменным катодом, генерирующие остросфокусированные электронные пучки, получили распространение в промышленности [1] России в технологиях электронно-лучевой сварки. Современное сварочное оборудование часто основано на принципе автоматического управления технологическим процессом. Одним из важных составляющих этого процесса является использование системы автоматического совмещения электронного пучка со стыком свариваемых изделий. Кроме того, в ряде случаев необходимо периодически корректировать линию стыка с положением на изделии электронного пучка. Системы автоматического наведения и ведения электронного пучка по стыку разрабатываются давно [2] и используют различные принципы позиционирования пучка относительно свариваемого изделия. Общим для этих систем является то, что все они предназначены для работы с термокатодными пушками.

Пушки с плазменным катодом имеют ряд особенностей, требующих разработки специальной аппаратуры в системах автоматического управления сварочным процессом. Принцип действия таких пушек основан на эмиссии электронов из плазмы газового разряда под действием высоковольтного электрического поля [1, 3]. Для создания эмитирующей плазмы используется моди-

фикация тлеющего разряда – низковольтный отражательный разряд с полым катодом низкого давления [1, 3]. Использование плазмы как эмиттера электронов дает пушкам с плазменным катодом в этих технологиях преимущество над накаливаемыми твердотельными эмиттерами. Так, например, плазменный катод (эмиттер) не нуждается в создании специальных мер защиты от возможных прорывов атмосферы, воздействия обратного ионного потока и других факторов, способных разрушить накаливаемый до высокой температуры твердотельный катод. В то же время ток плазменного эмиттера из-за шумов эмитирующей плазмы может быть более модулированным, чем ток термокатада.

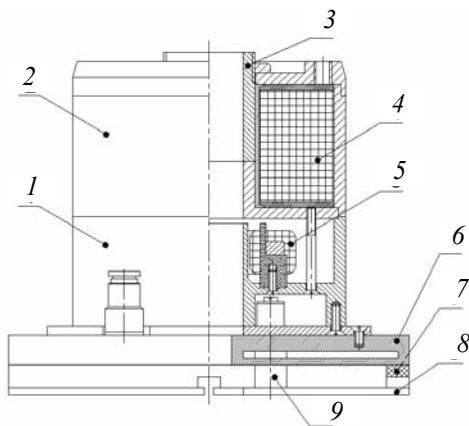
При небольшой ширине сварного шва наиболее точным способом позиционирования сфокусированного электронного луча на нем является способ [2, 4], основанный на обработке сигнала вторичных и отраженных от поверхности свариваемого изделия электронов. Сигнал формируется при сканировании поверхности свариваемых изделий сфокусированным электронным лучом и принимается на коллектор. Для получения качественного сигнала, несущего информацию о рельефе поверхности изделия, а соответственно о расположении сварного шва, электронный луч должен иметь как можно меньший диаметр и малую мощность. От поперечного размера электронного луча зависит разрешающая

способность этого метода, а малая мощность позволяет сохранять поверхность изделия без повреждений. Кроме того, на качество сигнала отраженных электронов существенно влияет и степень модуляции тока луча, сканирующего поверхность изделия.

Ток электронного пучка, генерируемый пушкой с плазменным катодом, модулирован по амплитуде. Частотный спектр модулирующих ток колебаний концентрации плазмы может иметь составляющие от десятков килогерц до десятков мегагерц [5]. При уменьшении тока пучка до единиц миллиампер модуляция может увеличиваться. В таких режимах работы пушки с плазменным катодом необходимо особое внимание уделять методам выделения полезного сигнала.

### Формирование сигнала отраженных электронов

При сканировании поверхности изделия сфокусированным электронным лучом возникает поток частиц, включающий в себя, в том числе и несущие информацию о топографии поверхности отраженные электроны. Фокусировка и отклонение луча, а также прием сигнала отраженных электронов осуществляется устройством, представленным на рис. 1.

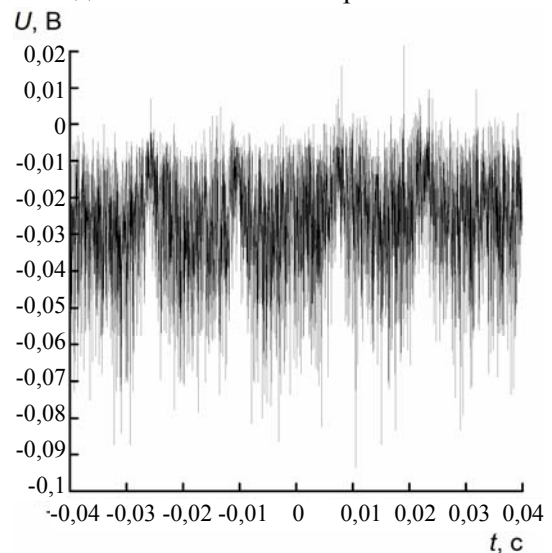


**Рис. 1.** Устройство фокусировки и отклонения луча с секционированным коллектором отраженных электронов: 1 – корпус отклоняющей системы, 2 – магнитопровод, 3 – немагнитная вставка, 4 – фокусирующая катушка, 5 – отклоняющие катушки, 6 – экран охлаждения, 7 – изолятор, 8 – коллектор, 9 – токосъем

Фокусирующая система (рис. 1) образована катушкой 4 и составным магнитопро-

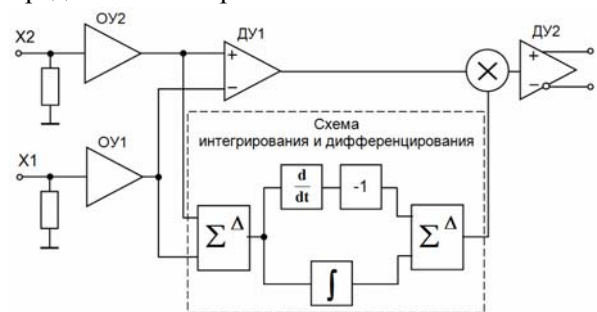
водом 2 со вставкой из немагнитного материала 3. К нижней части магнитопровода фокусирующей системы крепится отклоняющая система. Отклоняющая система состоит из немагнитного корпуса 1, в котором закреплены отклоняющие катушки 5. Нижняя часть корпуса отклоняющей системы соединена с водяным экраном охлаждения 6, предназначенным для экранировки пушки от теплового потока из зоны сварки. За экраном охлаждения размещается секционированный коллектор отраженных электронов 8. Коллектор изолирован от заземленного корпуса фокусирующей и отклоняющей системы и экрана охлаждения через капролоновое кольцо 7. Сигнал с каждой пары диаметрально расположенных секций коллектора поступает в двухканальный аналоговый блок.

Вид сигнала показан на рис. 2.



**Рис. 2.** Вид сигнала отраженных электронов, приходящий на одну секцию коллектора.  $U_{\text{уск}}=25\text{кВ}$ ,  $P=50\text{Вт}$

Схема блока для одного канала представлена на рис. 3.



**Рис. 3.** Блок-схема устройства для обработки сигнала с коллектора электронов

Усиленные входными операционными усилителями сигналы поступают в дифференциальный усилитель и схему интегрирования и дифференцирования. Дифференциальный усилитель компенсирует шумовую составляющую и формирует разностный сигнал, пропорциональный тангенсу угла наклона исследуемой поверхности к вертикальной плоскости. В схеме интегрирования и дифференцирования из входного сигнала выделяется информация о профиле поверхности. На выходе схемы формируется суммарный усиленный сигнал. Разрешающая способность, с которой формируется изображение поверхности, зависит от того, как далеко в частотной области разнесены полезный сигнал и шум. Перемножение сигналов с выходов схемы интегрирования и дифференцирования и дифференциального усилителя сдвигает спектр шумовой составляющей в высокочастотную область (увеличивает частоту шумовой составляющей в два раза) и увеличивает соотношение сигнал – шум с 5дБ до 25дБ.

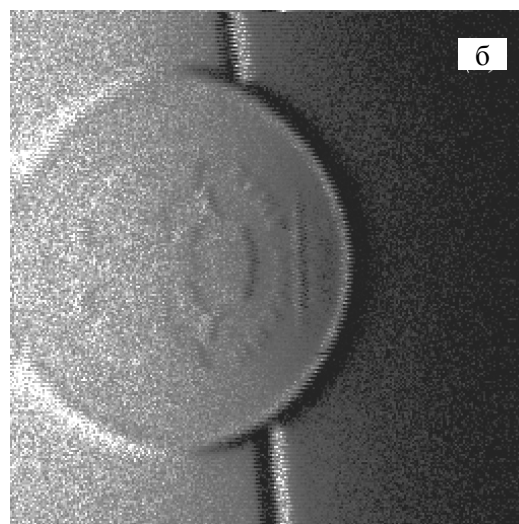
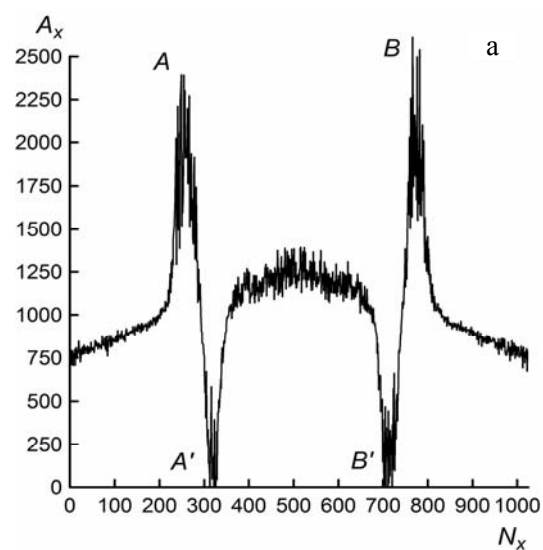
#### Визуализация поверхности и автоматическое наведение на стык

Сигнал с блока аналоговой обработки через усилитель с дифференциальным выходом, обеспечивающий защиту передаваемых данных от внешних помех, передается в блок управления нижнего уровня. В задачу блока управления нижнего уровня, построенного на 32-разрядном микропроцессоре, входят:

1. Управление источниками питания отклоняющей системы и формирование развертки луча;
2. Измерение и первичная обработка сигнала отраженных электронов;
3. Обмен данными с программой управления (прием управляющих команд и передача цифрового сигнала о состоянии поверхности и положении луча);
4. Формирование изображения в отраженных электронах.

В работе программно-аппаратного комплекса использован принцип синхронизации процессов сканирования поверхности электронным лучом и измерения сигнала отраженных электронов. Команда формирования развертки с заданной амплитудой и частотой с

компьютера через микропроцессор передается в управляемые источники тока, питающие катушки отклоняющей системы. Одновременно с перемещением луча по поверхности сигнал отраженных электронов передается в микропроцессор, где происходит первичная обработка сигнала и накопление информации об амплитуде тока отраженных электронов и соответствующей этой амплитуде координате поверхности. Получаемый массив данных передается в ПК по протоколу Ethernet.



**Рис. 4.** Вид сигнала (а) и изображение поверхности (б), полученные при сканировании электронным лучом:  $U_{\text{уск}}=25$  кВ,  $P=50$  Вт

На рис. 4а представлен оцифрованный дифференциальный сигнал, соответствующий прямому и обратному ходу луча при сканировании поверхности, содержащей стык с V-образной разделкой кромок. Точки A и A'

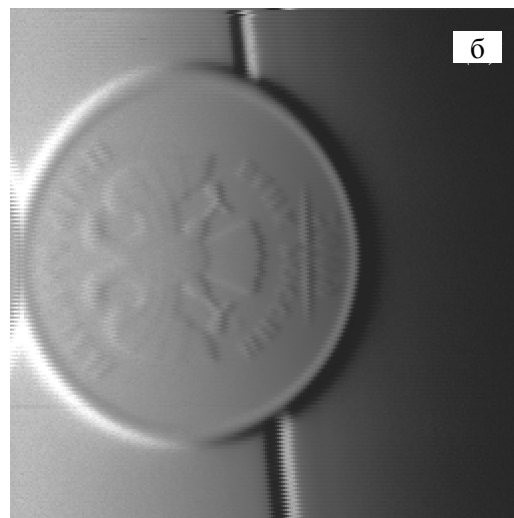
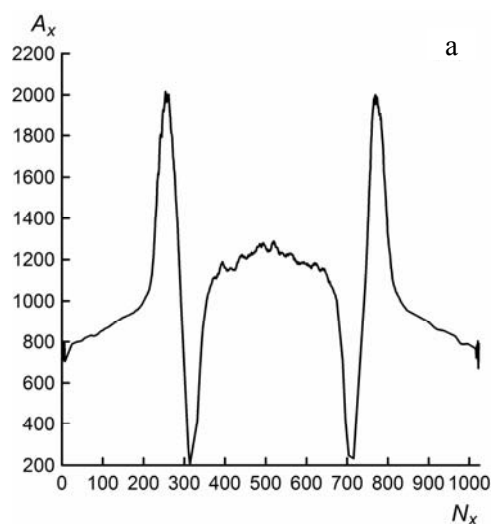
соответствуют прямому ходу луча, пересекающего стык, а  $B$  и  $B'$  – обратному. Центром стыка считается координата  $N_x$  поверхности, которой соответствует амплитуда  $A_x$  сигнала, равная половине  $A - A'$ . Обратный ход луча используется для корректировки процесса наведения. Если  $(A - A')/2 \neq (B - B')/2$ , то частота сканирования изменяется до того момента, пока не выполнится это равенство. По этому принципу построен алгоритм автоматического наведения.

Для формирования изображения (рис. 4б) из оцифрованного дифференциального сигнала используется традиционная в телевидении прогрессивная развертка. При этом точка на поверхности, с которой приходит максимум сигнала, будет иметь белый цвет, а точка, с которой приходит минимум сигнала – черный. Промежуточные по амплитуде значения сигнала отображаются различными оттенками серого цвета.

#### Программная фильтрация сигнала

Для повышения точности наведения луча на стык и улучшения качества изображения поверхности в разработанном устройстве использованы два способа снижения влияния шума. Первый основан на многократном измерении сигнала в одной координате (измерение с накоплением), второй способ – цифровая фильтрация. Использование первого способа дает значительное повышение качества сигнала уже при 500 измерениях. Однако при количестве измерений 1000 и более улучшения сигнала практически не происходит, что может свидетельствовать о стационарности шумовой составляющей. Недостатком использования только способа измерения с накоплением является резкое увеличение продолжительности сканирования всей поверхности. С целью повышения производительности программно-аппаратного комплекса был синтезирован цифровой фильтр, а количество измерений в первом способе уменьшено до 200. Цифровой фильтр синтезирован исходя из того, что основная энергия шума находится в высокочастотной области и значительно превышает пространственную частоту рельефа поверхности.

Программная обработка сигнала увеличила соотношение сигнал – шум до 42дБ, что позволило получить качественную картину поверхности (рис. 5) с разрешением  $512 \times 512$  dpi и частотой до 5 кадров в сек, а также реализовать алгоритм автоматического наведения на стык размером около 0,2 мм за 100 мкс при мощности в луче 50 Вт.



**Рис. 5.** Вид сигнала (а) и изображение поверхности (б), полученные при сканировании электронным лучом:  $U_{\text{уск}}=25$  кВ,  $P=50$  Вт. Изображение и сигнал получены при использовании программной фильтрации

Размытое изображение (см. рис. 5) поверхности, получаемое даже при использовании сглаженного сигнала и оптимальной фокусировке электронного пучка, связано с тем, что электронный луч фокусируется не в точку, а в пятно с конечными размерами. В этом случае задача восстановления размытого

изображения сводится к решению интегрального уравнения Фредгольма I рода [6]:

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} K(x, \tau) \times y(\tau) d\tau + n(x),$$

где  $f(x)$  – функция, описывающая сигнал с коллектора отраженных электронов;  $K(x, \tau)$  – ядро интегрального уравнения (функция, описывающая конечные размеры электронного пучка на поверхности);  $y(\tau)$  – функция, описывающая сигнал, полученный при взаимодействии сфокусированного в точку электронного пучка с поверхностью;  $n(x)$  – слагаемое, определяющее шумовую составляющую сигнала.

Уравнение является классическим примером некорректно поставленных задач. Для его решения использован метод численного интегрирования функций (метод прямоугольников), основанный на замене интегрального уравнения эквивалентной ему системой линейных алгебраических уравнений (СЛАУ).

Для решения СЛАУ использован метод регуляризации [7] плохо обусловленных СЛАУ, предложенный проф. А. А. Светлаковым.

При выборе метода решения исходили из следующих особенностей:

- число составляющих СЛАУ уравнений в два раза меньше числа входящих в нее неизвестных;
- матрица ее коэффициентов является прямоугольной матрицей максимального ранга;
- СЛАУ оказывается совместной при любой ее правой части.

Оценки показывают, что использование этого метода позволит повысить разрешающую способность программно-аппаратного комплекса с 512x512 dpi до 1024x1024 dpi, а точность наведения электронного луча на сварной шов до 50 мкм.

## Заключение

Разработанный программно-аппаратный комплекс позволяет осуществлять точное (до 50 мкм) наведение электронного луча на сварной шов, последующее автоматическое ведение по шву с использованием предва-

рительно собранной информации о координатах шва, а также получение динамической картины поверхности свариваемой детали с разрешением до 1024x1024 dpi.

Особенностью комплекса является его способность работать при входном сигнале с низким (5дБ) соотношением сигнал – шум.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 11-08-98063-р\_сибирь\_а.*

## Литература

1. Hassel T., Rempe N., Kornilov S., Beniyash A. Electron-beam facilities based on plasma-cathode guns // *Welding and Cutting*. 2012. Vol. 11. № 2. P. 122–127.
2. Назаренко О. К., Кайдалов А. А., Ковбасенко С. Н. и др. *Электронно-лучевая сварка* / под ред. Б. Е. Патона. Киев: Наукова думка, 1987. 256 с.
3. Окс Е. М. *Источники электронов с плазменным катодом*. Томск: Изд-во НТЛ, 2005. 216 с.
4. Корнилов С. Ю., Лакида П. А., Мазалов А. Л., Осипов И. В., Рау А. Г., Ремпе Н. Г. *Электронно-лучевая система визуального контроля поверхности* // Докл. Томского гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. 2008. № 1. С. 14–18.
5. *Источники электронов с плазменным эмиттером* / под ред. Ю. Е. Крейнделя. Новосибирск: Наука, 1983. 120 с.
6. Васильева А. Б., Тихонов Н. А. *Интегральные уравнения*. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 157 с.
7. Майстренко А. В., Светлаков А. А. *Методы и алгоритмы цифрового дифференцирования сигналов в системах реального времени*. Томск: Изд-во ТУСУР, 2009. 139 с.