

## РЕЗИСТОМЕТРИЧЕСКИЙ СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ СВАРКИ ДЛЯ ТРЕНАЖЕРНЫХ СВАРОЧНЫХ СИСТЕМ

Л. М. ЛОБАНОВ<sup>1</sup>, Н. М. МАХЛИН<sup>2</sup>, А. Е. КОРОТЫНСКИЙ<sup>1</sup>, В. Ю. БУРЯК<sup>2</sup>, А. Г. СИПАРЕНКО<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>ГП «НИЦ СКАЭ ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: electro@paton.kiev.ua

Рассмотрены некоторые теоретические вопросы резистометрического способа определения координат пятна сварочной дуги и оценивания скорости перемещения электрода при осуществлении или имитации дуговой сварки, а также особенности построения аппаратной части и программного обеспечения тренажерных сварочных систем с использованием этого способа. Приведены примеры использования этого метода в разработанных и промышленно изготавливаемых в ГП «Научно-инженерный центр сварки и контроля в отрасли атомной энергетики Украины Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины» (НИЦ СКАЭ) аппаратно-программных комплексах (сварочных тренажерах), а также основные варианты схемотехнического построения устройств для реализации в тренажерных сварочных системах резистометрического способа. Библиогр. 17, рис. 4.

*Ключевые слова:* координаты пятна дуги, скорость сварки, тренажерные сварочные системы, имитатор свариваемого изделия, устройства контроля скорости сварки, датчики сварочного тока, «токовая петля»

В процессе развития работ по созданию тренажерных сварочных систем (ТСС) были предложены различные способы оценки скорости сварки и устройства, реализующие эти способы [1–3]. По мнению многих авторов, для оценки скорости сварки в дуговых ТСС наиболее приемлемы технические средства, использующие видеосенсоры [4], устройства акустической локации [5], приемники оптического [6–8] или теплового излучения [1, 9, 10].

Очевидно, что применение видеосенсоров обеспечивает измерение скорости сварки с высокой точностью, однако на сегодня при этом возрастает сложность и стоимость аппаратных и программных средств ТСС, что в подавляющем большинстве случаев экономически неоправданно.

Использование методов акустической локации в дуговых ТСС (особенно в малоамперных) сильно затруднено из-за низкого уровня полезных сигналов имитатора дуги [11] и поэтому малоперспективно.

Для устройств контроля скорости сварки (УКСС), построенных с применением дискретных чувствительных элементов, воспринимающих оптическое излучение видимого или инфракрасного диапазона от перемещающейся дуги, характерна зависимость от оптического состояния окружающей среды, а для УКСС на базе термодатчиков — зависимость от геометрической формы окружающей тел и расстояния от них до термодатчиков, а также от температуры и теплопроводности окружающей среды. Кроме сравнительно невысокой точности измерений к недостаткам УКСС, выпол-

ненных на приемниках оптического или теплового излучения, следует отнести необходимость схемно-конструктивных усложнений как аппаратного интерфейса ТСС, так и входящих в нее манипулятора-позиционера и имитаторов сварочных инструментов или свариваемого изделия.

Анализ возможностей известных способов УКСС и все более возрастающих технологических и дидактических требований к дуговым ТСС показывает, что большинство известных и существующих УКСС уже далеко не в полной мере соответствуют этим требованиям.

Между тем, в дуговых ТСС вполне удовлетворительные результаты могут быть достигнуты с помощью сравнительно легко осуществимого резистометрического способа определения координат перемещающейся дуги и оценивания скорости сварки. В основу этого способа положен разработанный В. В. Васильевым и Л. А. Симак в Институте проблем моделирования в энергетике им. Г. Е. Пухова НАН Украины метод определения координат измерительного зонда в проводящей среде [12, 13], в дальнейшем получивший развитие в ИЭС им. Е. О. Патона и НИЦ СКАЭ для систем мониторинга процессов дуговой сварки и ТСС применительно к перемещающемуся пятну сварочной дуги или ее имитатора.

Сущность резистометрического способа поясняется с помощью рис. 1.

Типичный для ТСС имитатор свариваемого изделия (ИСИ) представляет собой стальную пластину прямоугольной формы, длина которой  $l_0$ , ширина  $d_0$  и толщина  $\delta_0$ , причем  $\delta_0 \ll d_0 \ll l_0$ .

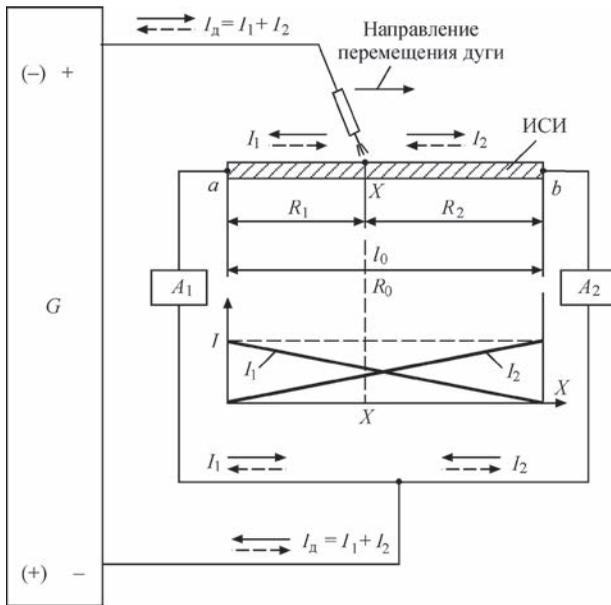


Рис. 1. Схема резистометрического способа определения координаты пятна сварочной дуги и измерения скорости сварки в ТСС (описание см. в тексте;  $A_1, A_2$  — датчики тока в ветвях  $сax$  и  $сbx$  сварочного контура)

Один из выходных полюсов сварочного источника питания  $G$  подключен к точке соединения двух ветвей ( $ac$  и  $bc$ ), каждая из которых второй точкой подсоединена к одному из двух токоподводов ( $a$  или  $b$ ) на противоположных торцевых сторонах ИСИ. Второй выходной полюс сварочного источника питания соединен с токоподводом имитатора сварочного инструмента (электрододержателя).

При использовании сварочного источника в режиме источника (стабилизатора) тока, характеризующегося «штыковой» внешней вольт-амперной характеристикой (что имеет место в большинстве ТСС), сварочный ток  $I_d$  не зависит от падений напряжения на дуге, в ИСИ, в проводах и токоподводах сварочной цепи.

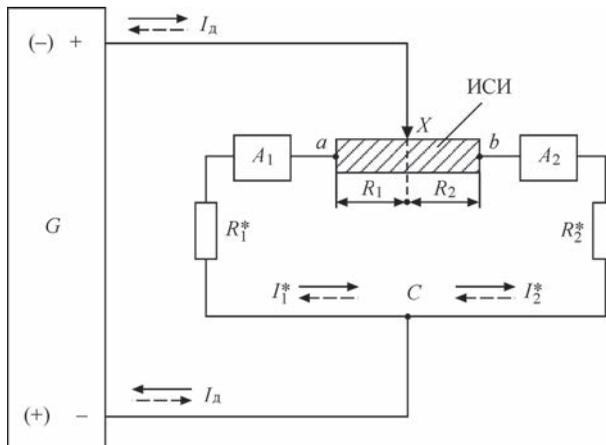


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема сварочного контура ТСС (описание см. в тексте)

Из очевидного равенства  $R_0 = R_1 + R_2$  (где  $R_0$  — электрическое сопротивление ИСИ;  $R_1, R_2$  — сопротивления его участков  $ax$  и  $bx$ , соответственно) и предположения о неизменности сечения ИСИ по всей его длине  $l_0$  вытекает, что координата  $x$  дугового пятна на ИСИ определяется соотношением:

$$x = l_0 R_1 / R_0 = l_0 (1 - R_2 / R_0). \quad (1)$$

В соответствии с законами Кирхгофа и при допущениях о том, что электрические сопротивления ИСИ и его отдельных участков в процессе сварки остаются неизменными, а электрические сопротивления ветвей  $ac$  и  $bc$  равны между собой и пренебрежительно малы по сравнению со сопротивлением ИСИ, для участков  $сax$  и  $сbx$  справедлива система уравнений:

$$\begin{cases} I_1 + I_2 = I_d \\ I_1 R_1 = I_2 R_2 \end{cases}, \quad (2)$$

где  $I_1, I_2$  — токи, протекающие через участки  $сax$  и  $сbx$ , соответственно.

Решением системы уравнений (2) с учетом выражения (1) являются соотношения:

$$I_1 = I_d (1 - x / l_0), \quad (3)$$

$$I_2 = I_d x / l_0, \quad (4)$$

из которых получаем выражение для координаты пятна дуги  $x$ :

$$x = l_0 (1 - I_1 / I_d) = l_0 I_2 / I_d, \quad (5)$$

а из него — выражение для скорости перемещения дуги (скорости сварки)  $V_c$ :

$$V_c = dx/dt = l_0 / I_d (-dI_1/dt) = l_0 / I_d dI_2/dt. \quad (6)$$

Таким образом, решение задачи по оценке скорости сварки в ТСС сводится к определению изменений во времени токов в ветвях, которыми ИСИ подключен к одному из выходных полюсов сварочного источника питания.

Реальные соединения ИСИ со сварочной цепью выполняются проводниками, имеющими конечную длину и определенное сечение, а значит, обладающими омическим сопротивлением.

На рис. 2 приведена эквивалентная схема сварочного контура, в которой под резисторами  $R_1^*$  и  $R_2^*$  подразумеваются активные сопротивления ветвей  $ac$  и  $bc$ . Очевидно, что с учетом  $R_1^*$  и  $R_2^*$  система уравнений для участков  $сax$  и  $сbx$  имеет вид:

$$\begin{cases} I_1^* + I_2^* = I_d \\ I_1^* (R_1 + R_1^*) = I_2^* (R_2 + R_2^*) \end{cases}, \quad (7)$$

где  $I_1^*, I_2^*$  — токи через реальные участки  $сax$  и  $сbx$ .

Решая систему уравнений (7), получим выражения: для токов  $I_1^*, I_2^*$ :

$$I_1^* = \frac{I_{\text{д}}(R_2 + R_2^*)}{R_0 + R_1^* + R_2^*}, \quad (8)$$

$$I_2^* = \frac{I_{\text{д}}(R_1 + R_1^*)}{R_0 + R_1^* + R_2^*}, \quad (9)$$

для координаты пятна дуги:

$$\begin{aligned} x^* &= l_0 \left[ \left( 1 + \frac{R_2^*}{R_0} \right) - \frac{I_1^*}{I_{\text{д}}} \left( 1 + \left( R_1^* + \frac{R_2^*}{R_0} \right) \right) \right] = \\ &= l_0 \left[ \frac{I_2^*}{I_{\text{д}}} \left( 1 + \left( R_1^* + \frac{R_2^*}{R_0} \right) - \frac{R_1^*}{R_0} \right) \right]; \end{aligned} \quad (10)$$

для скорости сварки:

$$\begin{aligned} V_{\text{с}}^* &= \frac{l_0}{I_{\text{д}}} \left( 1 + \frac{R_1^* + R_2^*}{R_0} \right) \left( - \frac{dI_1^*}{dt} \right) = \\ &= \frac{l_0}{I_{\text{д}}} \left( 1 + \frac{R_1^* + R_2^*}{R_0} \right) \frac{dI_2^*}{dt}. \end{aligned} \quad (11)$$

При этом:

$$\frac{dI_1^*}{dt} = \left( \frac{1}{1 + \frac{R_1^* + R_2^*}{R_0}} \right) \frac{dI_1}{dt}, \quad (12)$$

$$\frac{dI_2^*}{dt} = \left( \frac{1}{1 + \frac{R_1^* + R_2^*}{R_0}} \right) \frac{dI_2}{dt}. \quad (13)$$

Выполнив простые преобразования с подстановкой выражений (8) и (9) в (10), а выражений (12) и (13) в (11), легко убедиться, что  $x^* = x$ , а  $V_{\text{с}}^* = V_{\text{с}}$ , и, следовательно, активные сопротивления  $R_1^*$  и  $R_2^*$  ветвей  $ac$  и  $bc$  сварочного контура влияния на определение координаты пятна дуги и скорости сварки не оказывают. Вместе с тем из выражений (8), (9), (12) и (13) следует, что от значения отношения  $(R_1^* + R_2^*)/R_0$  зависят значения токов  $I_1^*$ ,  $I_2^*$  и их производных  $dI_1^*/dt$  и  $dI_2^*/dt$ .

От отношения  $(R_1^* + R_2^*)/R_0$  существенно зависит и важная для реализации резистометрического способа характеристика, которая может быть названа чувствительностью по току  $E_i$  и определена через значения токов  $I_1^*$ ,  $I_2^*$  на единицу длины ИСИ по выражению

$$E_i = \frac{I_{\text{д}}}{l_0} \left( \frac{1}{1 + \frac{R_1^* + R_2^*}{R_0}} \right). \quad (14)$$

В процессе проведенных в ИЭС совместно с НИЦ СКАЭ экспериментальных и технологических работ была исследована зависимость  $E_{\text{отн}} = f(k_R)$ , причем под относительной чувствительностью  $E_{\text{отн}}$  понимается отношение  $E_i/E_{i0}$ , где  $E_{i0}$  — чувствительность при  $R_1^* = R_2^* = 0$ , а  $k_R = 1 + (R_1^* + R_2^*)/R_0$ . При этом установлено, что зависимость  $E_{\text{отн}} = f(k_R)$  имеет гиперболический характер и наиболее резко выражена при  $k_R < 1,2$ .

В реальных ТСС, как правило,  $k_R > 1,2$ , что обуславливает возможность рационального выбора сечений и массы проводов ветвей сварочного контура. Так, например, в малоамперном дуговом тренажере сварщика МДТС-05М1 в качестве ИСИ используется пластина из низкоуглеродистой стали (в частности, Ст3), рабочая длина которой  $l_0 = 360$  мм, а  $R_0 = 0,45$  МОм. Длина проводника каждой из ветвей  $ac$  и  $bc$  сварочного контура составляет 0,45 м. При сечении медного проводника каждой ветви 30 мм<sup>2</sup> активное сопротивление  $R_1^* = R_2^* = 0,17$  МОм,  $k_R = 1,46$  и (при сварочном токе  $I_{\text{д}} = 4,5$  А)  $E_i = 6,84$  мА/мм.

Оценку точности измерения скорости сварки резистометрическим способом с учетом влияния  $R_1^*$  и  $R_2^*$  можно провести, определив среднеквадратичную погрешность  $\sigma_{\text{отн}}$  по выражению

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{отн}} &= \frac{dV_{\text{с}}^*}{V_{\text{с}}} = \\ &= \sqrt{\left( \frac{dl_0}{l_0} \right)^2 + \left( \frac{dR_1^*}{R_0 + R_1^* + R_2^*} \right)^2 + \\ &+ \left( \frac{R_1^* + R_2^*}{R_0 + R_1^* + R_2^*} \right)^2 + \left( \frac{dR_0}{R_0} \right)^2 + \left( \frac{dI_{\text{д}}^*}{I_{\text{д}}} \right)^2 + \left( \frac{di}{i} \right)^2}, \end{aligned} \quad (15)$$

где  $dV_{\text{с}}^*$  дифференциал функции  $V_{\text{с}}^*$ ;  $i = dI_1^*/dt$  или  $i = dI_2^*/dt$ ;  $di = d(dI_1^*/dt)$  или  $di = d(dI_2^*/dt)$ .

Поскольку в выражении (15) слагаемые, содержащие  $R_0$ ,  $R_1^*$ ,  $R_2^*$ , как показывает численный анализ, пренебрежительно малы, то формула для определения  $\sigma_{\text{отн}}$  с достаточно точным приближением может быть представлена в виде

$$\sigma_{\text{отн}} = \sqrt{\left( \frac{dl_0}{l_0} \right)^2 + \left( \frac{d(I_1^* + I_2^*)}{I_1^* + I_2^*} \right)^2 + \left( \frac{di}{i} \right)^2}. \quad (16)$$

Выражение (16) позволяет сделать вывод о том, что погрешность измерения  $V_{\text{с}}$  определяется погрешностями измерений  $l_0$ ,  $I_1^*$ ,  $I_2^*$ ,  $dI_1^*/dt$  или  $dI_2^*/dt$ , которые, в свою очередь, зависят от точностных характеристик соответствующих инструментов и измерительных устройств.

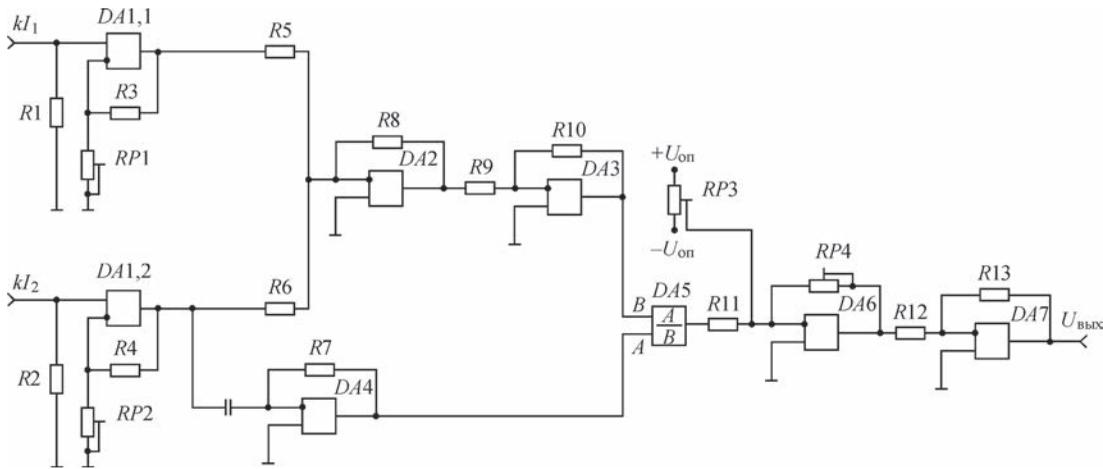


Рис. 3. Упрощенная электрическая принципиальная схема одного из вариантов построения аналогового УКСС

Реализация резистометрического способа может быть осуществлена с помощью аналоговых или цифровых УКСС.

К достоинствам аналоговых УКСС следует отнести сравнительную простоту схемотехнических решений и алгоритмов их работы, высокое быстродействие, возможность использования элементной базы массового применения, относительно невысокую стоимость, а к недостаткам — ограниченную точность дифференцирования сигналов, отражающих изменения координаты пятна дуги и необходимость периодических подрегулировок для компенсации дрейфа нулевых значений выходных сигналов операционных усилителей и инструментальных перекалибровок при изменении начальных условий (размеров ИСИ, значений тока дуги  $I_d$  и т. п.).

На рис. 3 приведена упрощенная электрическая схема одного из возможных вариантов построения аналогового УКСС. Устройство содержит входной масштабирующий усилитель  $DA1$ , также выполняющий функцию масштабирования сумматор  $DA2$ , функциональный делитель  $DA5$ , инвертирующий усилитель  $DA3$ , дифференцирующий усилитель  $DA4$  и реализующие функцию  $U_{\text{вых}} = k(AU_{\text{вх}})$ , где  $k$  и  $A$  — коэффициенты пропорциональности и масштабирования соответственно, выходные усилители  $DA6$  и  $DA7$ . Подстроечные резисторы  $RP1$  и  $RP2$  служат для подрегулирования устройства, а резисторы  $RP3$  и  $RP4$  — для его калибровки. Уровни выходных сигналов устройства, отображающих координату пятна дуги  $x^*$  и скорости сварки  $V_c^*$ , выбираются исходя из требуемого диапазона стандартных сигналов, например,  $\pm (0 \dots 5)$  В или  $\pm (0 \dots 10)$  В.

По сравнению с аналоговыми цифровые УКСС обеспечивают значительно более высокую помехоустойчивость и точность измерений, возможность оперативного изменения программными средствами алгоритма работы и выполнения калибровок и подстроек, стабильность параметров в приемлемом диапазоне изменений воздейств-

ющих климатических факторов внешней среды. Вместе с тем, поскольку в состав цифровых УКСС входит такой сложный по внутренней структуре и относительно дорогостоящий функциональный узел, как аналого-цифровой преобразователь (АЦП), стоимость цифровых УКСС существенно превышает стоимость аналоговых устройств.

Структурная схема варианта цифрового УКСС приведена на рис. 4. В состав устройства входят нормирующие усилители  $DA1.1$ ,  $DA1.2$  и АЦП  $DA4$ . Для повышения помехоустойчивости АЦП в устройство введены активные фильтры нижних частот с единичным усилением  $DA2$  и  $DA3$ . Нормирующие усилители  $DA1.1$  и  $DA1.2$  обеспечивают поступление на аналоговые входы АЦП сигналов в регламентированном диапазоне уровней, например,  $\pm (0 \dots 1,25)$  В или  $\pm (0 \dots 2,5)$  В. Тип АЦП выбирается из условий его совместимости с персональным компьютером (ПК), в том числе по уровням выходных сигналов АЦП и программному обеспечению. При этом необходимо отметить,

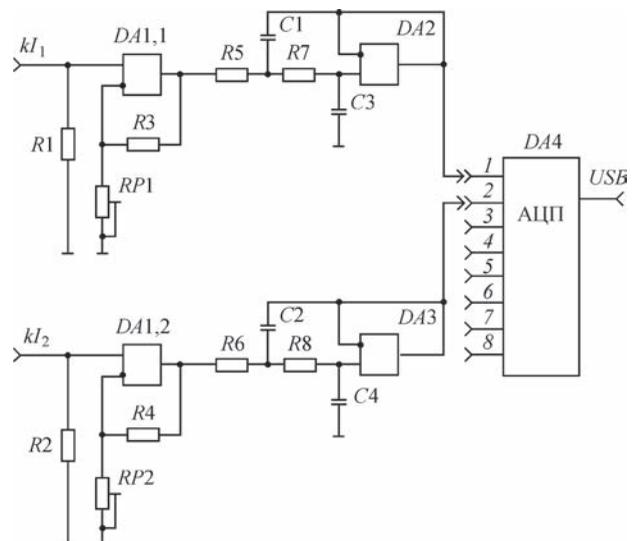


Рис. 4. Упрощенная электрическая принципиальная схема одного из вариантов построения цифрового УКСС

что поскольку практически любой АЦП, предназначенный для ввода информации в ПК, имеет не менее восьми входных аналоговых каналов, то он может быть использован не только для ввода информации о координате пятна дуги и скорости сварки, но и о напряжении (длине) дуги, об угловых положениях электрода имитатора сварочного инструмента и о других параметрах, характеризующих процесс тренажа или тестирования.

И аналоговые, и цифровые УКСС должны обеспечивать их калибровку, учитывающую начальные условия — геометрические размеры ИСИ, активные сопротивления проводов и переходные сопротивления контактных соединений ветвей сварочной цепи, влияние фактора  $k_R$ , чувствительность  $E_i$ . Калибровка аналоговых УКСС более трудоемка и требует применения дополнительной измерительной аппаратуры, для калибровки цифровых УКСС достаточно программных средств.

Обязательными сенсорными компонентами как аналоговых, так и цифровых УКСС являются два идентичных датчика тока, которые должны иметь линейную передаточную характеристику (коэффициент нелинейности  $\leq 0,5\%$ ) во всем диапазоне возможных изменений сварочного тока вне зависимости от его формы и полярности, высокой точностью (приведенная погрешность не более  $\pm 1\%$ ), широким динамическим и частотным диапазоном (полоса пропускания не менее 50 кГц), стойкостью к воздействию наводок и помех, всегда имеющих место при дуговой сварке. Кроме того, датчики должны обеспечивать гальваническую развязку входных и выходных цепей и не вносить заметных дополнительных сопротивлений в сварочный контур. Применительно к дуговым ТСС этим требованиям в наибольшей степени соответствуют датчики на основе эффекта Холла, включая датчики тока, серийно изготавливаемые рядом фирм, в том числе фирмы LEM (Швейцария) и ООО «ЛЕМ Россия» (РФ) — например, датчики тока LAN25-NP с погрешностью измерения тока  $\pm 0,3\%$ , ПАО «ЧЕЗАР» (Украина) — например, датчики тока ДИТ-50М, ДСТ-250, ДСТ-500 с погрешностью измерения  $\pm 0,1\%$ . Такие датчики тока имеют потенциальный или токовый выход. Последний позволяет формировать связь между информационным выходом датчика и входным усилителем УКСС в виде «токовой петли» и тем самым существенно повысить помехоустойчивость устройства, однако в этом случае входные каскады УКСС должны быть выполнены по схеме преобразователя «ток — напряжение».

В ИЭС совместно с НИЦ СКАЭ были проведены эксперименты по проверке точности цифровых УКСС, входящих в состав компьютеризированных малоамперного дугового тренажера

сварщика МДТС-05М1 и тренажера сварщика дуговой сварки ТСДС-06М. Для перемещения с заданной скоростью неплавящегося электрода вдоль неподвижно закрепленного ИСИ использовали механизм установки, собранной на базе автомата АДСВ-6 для аргонодуговой сварки. Источником питания дуги в случае МДТС-05М1 служил модуль силовой сварочный МСС-05 этого тренажера, функционирующий в режиме источника тока и обеспечивающий сварочный ток  $(4,5 \pm 0,3)$  А во всем технологически обоснованном диапазоне длины дуги, а в случае ТСДС-06М — энергетический модуль на базе универсального сварочного инвертора «ПРОФИ TIG 200», также функционирующий в режиме источника тока и обеспечивающий сварочный ток 80, 100, 120, 140, 160 и 180 А с точностью  $\pm 5$  А. В качестве ИСИ в случае применения МДТС-05М1 использовали пластину из Ст3, общая длина которой 440 мм (рабочая длина  $l_0 = 360$  мм), ширина 40 мм, толщина 2 мм, а в случае применения ТСДС-06М — пластину из такой же стали, общая длина которой 470 мм (рабочая длина  $l_0 = 390$  мм), ширина 60 мм, толщина 10 мм. Сварку выполняли при постоянной скорости перемещения неплавящегося электрода (номинальным диаметром 2,0 мм в случае МДТС-05М1 и 3,0 мм в случае ТСДС-06М) 2, 5 и 8 мм/с, при каждом фиксированном значении скорости сварки после каждого прохода (протяженностью 360 и 390 мм, соответственно) осуществляли проход дуги в обратном направлении. Каждый эксперимент повторяли не менее пяти раз. Значения скорости сварки, полученные с помощью системы УКСС — ПК тренажеров МДТС-05М1 и ТСДС-06М, сравнивали со значениями скорости перемещения электрода, контролируемые приборами (в частности, амперметрами типа М42100) упомянутой выше экспериментальной установки с погрешностью, не превышающей  $\pm 1,5\%$ . Статистической обработкой результатов экспериментов установлено, что относительная погрешность измерений скорости сварки с помощью цифровых УКСС в случае МДТС-05М1 не превышает  $\pm 2,0\%$ , а в случае ТСДС-06М  $\pm 2,5\%$ .

Следует подчеркнуть, что резистометрический способ определения линейной координаты пятна сварочной дуги и измерения скорости сварки, а также цифровые УКСС для его реализации успешно использованы в разработанных в ИЭС совместно с НИЦ СКАЭ [14–17] современных аппаратно-программных тренажерных комплексах (сварочных тренажерах) МДТС-05М1, ТСДС-06М и ТСДС-06М1, широко представленных и находящихся в эксплуатации в Украине и в ряде стран ближнего и дальнего зарубежья (например, в Казахстане, Беларуси, РФ, Македонии, Китае

и в др. странах). Только в России в эксплуатации находятся более 1200 таких аппаратно-программных тренажерных комплексов, при этом в ряде их образовательных заведений, учебных и аттестационных центров, на базе этих тренажеров созданы целые тренажерные классы и лаборатории для подготовки сварщиков РДС, ТИГ- и МИГ/МАГ-сварки. Опыт применения этих технических средств обучения подтверждает их высокую эксплуатационную надежность, экономичность и эффективность как для профессионального отбора и начальной профессиональной подготовки сварщиков, так и для повышения квалификации сварочного персонала, производственного тренажа и тестирования, а в ряде случаев и для допускового контроля.

### Выводы

1. Резистометрический способ измерения скорости сварки обеспечивает возможность сравнительно простым методом с приемлемой достоверностью определять линейную координату пятна сварочной дуги и скорость его перемещения в дуговых ТСС.

2. Учитывая тенденции развития ТСС наиболее перспективными устройствами, обеспечивающими реализацию резистометрического способа определения линейной координаты пятна сварочной дуги и измерения скорости сварки, являются цифровые УКСС.

3. В некоторых случаях резистометрический способ измерения скорости сварки может быть применен и для решения задач мониторинга реальных процессов дуговой сварки.

*В заключение авторы считают необходимым выразить признательность инженерам Скопюку М. И., Гавве В. М., Череднику А. Д., Попову В. Е., Мужиченко А. Ф., Мухе А. А. и Оляяненко Д. С. за ценную помощь, которую они оказали при подготовке настоящей работы.*

### Список литературы

1. Даниляк С. Н. (1990) Вопросы построения измерительных преобразователей контроля теплосодержания сварочной ванны и скорости сварки для сварочных тренажеров. *Моделирование в тренажерных системах*. Киев, Наукова Думка, сс. 111–118.
2. Бигдаш В. Д. (1990) Устройства контроля скорости сварки в тренажерных сварочных системах. *Там же*, сс. 143–150.
3. Васильев В. В., Симак Л. А., Богдановский В. А. и др. (2003) *Имитационное моделирование и тренажерно-обучающие системы в электросварке*. Васильев В. В. (ред.), Киев, НАН Украины.
4. Бут С. Н., Чернов А. В., Кривин В. В. (2003) Система отслеживания движения в тренажере оператора ручной дуговой сварки. *Известия вузов. Электромеханика*, **3**, 74–75.
5. Rose J. L. et al. (1984) *Closed loop control of welding process using ultrasonic measurement*. GB, Pat. 2130369, IC G01S 15/16; B 23K9/12.
6. Мияда Содзабури и др. (1983) *Автоматическое измерение скорости сварки детектированием дуги*. Япония, Заявка 58-107273, МКИЗ В 23K9/10.

7. Васильев В. В., Даниляк С. Н., Ильчишин А. П. и др. (1988) *Тренажер для обучения навыкам ведения сварки*. СССР, А. с. 1388935, МКИЗ G09 В 19/24.
8. Васильев В. В., Даниляк С. Н., Ткаченко В. В. и др. (1991) *Тренажер сварщика*. СССР, А. с. 1663619, МКИЗ G09 В 19/24.
9. Патон Б. Е., Васильев В. В., Богдановский В. А. и др. (1987) *Тренажер сварщика*. СССР, А. с. 1302313, МКИЗ G09 В 19/24.
10. Васильев В. В., Даниляк С. Н. и др. (1992) *Устройство для контроля скорости сварки и теплосодержания сварочной ванны*. СССР, А. с. 1773622, МКИЗ В 23K 9/10.
11. Ланкин Ю. Н. (2001) Акустическая эмиссия сварочной дуги. *Автоматическая сварка*, **2**, 25–31.
12. Васильев В. В., Грездов Г. И., Симак Л. А. и др. (2002) *Моделирование динамических систем: Аспекты мониторинга и обработки сигналов*. Васильев В. В. (ред.), Киев, НАН Украины.
13. Симак Л. А. (1984) Метод автоматического определения координат зонда в проводящей среде на основе дифференциальных преобразований. *Электронное моделирование*, **6**, 90–91.
14. Патон Б. Е., Коротинский О. Е., Богдановский В. О. та ін. (2009) *Спосіб оцінювання параметрів руху зварювальної дуги в дугових тренажерних системах*. Україна, Пат. № 86609.
15. Лобанов Л. М., Богдановський В. О., Коротинський О. С. та ін. (2009) *Дуговий тренажер зварника*. Україна, Пат. № 87395.
16. Лобанов Л. М., Богдановский В. А., Коротинский А. Е. и др. (2009) *Тренажер для обучения сварщика ручной дуговой сварке плавящимся и неплавящимся электродом*. РФ, Пат. № 2373040.
17. Патон Б. Е., Коротинский А. Е., Богдановский В. А. и др. (2010) *Способ определения параметров движения сварочной дуги при тренаже или тестировании сварщика на дуговых тренажерных системах*. РФ, Пат. № 2396158 С2.

### References

1. Danilyak, S.N. (1990) *Problems of construction of measuring transducers for control of welding pool heat content and welding speed for welding simulators: Simulation in training system*. Kiev, Naukova Dumka, pp. 111-118 [in Russian].
2. Bigdash, V.D. (1990) Device for welding speed control in training welding systems. *Ibid.*, pp. 143-150 [in Russian].
3. Vasiliev, V.V., Simak, L.A., Bogdanovsky, V.A. et al. (2003) *Simulation and training systems in electric welding*. Ed. by V.V. Vasiliev. Kiev, NANU [in Russian].
4. But, S.N., Chernov, A.V., Krivin, V.V. (2003) System of movement tracking in simulator of manual arc welding operator. *Uzv. Vuzov. Elektromekhanika*, **3**, 74-75 [in Russian].
5. Rose, J.L. et al. (1984) *Closed loop control of welding process using ultrasonic measurement*. Pat. 2130369 GB, Int. Cl. G01S 15/16; B 23K99/12.
6. Miyada Sodzaburi et al. (1983) *Automatic measurement of welding speed by arc detection*. Pat. application 58-107273 Japan, Int. Cl. B 23K9/70.
7. Vasiliev, V.V., Danilyak, S.N., Ilchishin, A.P. et al. (1988) *Simulator for training the welding habits*. USSR author's cert. 1388935, Int. Cl. G09 B 19/24 [in Russian].
8. Vasiliev, V.V., Danilyak, S.N., Tkachenko, V.V. et al. (1991) *Simulator of welding*. USSR author's cert., Int. Cl. G09 B 19/24 [in Russian].
9. Paton, B.E., Vasiliev, V.V., Bogdanovsky, V.A. et al. (1987) *Simulator of welder*. USSR author's cert. 1302313, Int. Cl. G09 B 19/24 [in Russian].
10. Vasiliev, V. V., Danilyak, S. N. et al. (1992) *Device for control of welding speed and heat content of welding pool*. USSR author's cert. 1773622, Int. Cl. B 23K 9/10 [in Russian].
11. Lankin, Yu.N. (2001) Acoustic emission of the welding arc (Review). *The Paton Welding J.*, **2**, 25-32.
12. Vasiliev, V.V., Grezdov, G.I., Simak, L.A. et al. (2002) *Modeling of dynamic systems: Aspects of monitoring and*

- signal processing. V.V. Vasiliev (Ed.), Kiev, NASU [in Russian].
13. Simak, L.A. (1984) Method of automatic determination of probe coordinates in conducting medium based on differential transformations. *Elektronnoe Modelirovanie*, 6, 90-91 [in Russian].
  14. Paton, B.E., Korotynsky, O.E., Bogdanovsky, V.O. et al. (2009) *Method of evaluation of parameters of welding arc movement in arc training systems*. Pat. 86609 Ukraine [in Ukrainian].
  15. Lobanov, L.M., Bogdanovsky, V.O., Korotynsky, O.E. et al. (2009) *Arc simulator of welder*. Pat. 87395 Ukraine [in Ukrainian].
  16. Lobanov, L.M., Bogdanovsky, V.A., Korotynsky, A.E. et al. (2009) *Simulator for training of welder of arc consumable and non-consumable electrode welding*. Pat. 2373040 RF [in Russian].
  17. Paton, B.E., Korotynsky, A.E., Bogdanovsky, V.A. et al. (2010) *Method of determination of parameters of welding arc movement in training and testing of welder on arc training systems*. Pat. 2396158 C2 RF [in Russian].

Л. М. Лобанов<sup>1</sup>, Н. М. Махлін<sup>2</sup>, О. Є. Коротинський<sup>1</sup>,  
В. Ю. Буряк<sup>2</sup>, О. Г. Сіпаренко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.  
03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.  
E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>ДП «НІЦ ЗКАЕ ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України».  
03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.  
E-mail: electro@paton.kiev.ua

#### РЕЗИСТОМЕТРИЧНИЙ СПОСІБ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ЗВАРЮВАННЯ ДЛЯ ТРЕНАЖЕРНИХ ЗВАРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

Розглянуто деякі теоретичні питання резистометричного способу визначення координат плями зварювальної дуги і оцінювання швидкості переміщення електрода при здійсненні або імітації дугового зварювання, а також особливості побудови апаратної частини і програмного забезпечення тренажерних зварювальних систем з використанням цього способу. Наведені приклади використання цього методу в розроблених і промислово виготовлених в ДП «Науково-інженерний центр зварювання та контролю в галузі атомної енергетики України Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України»

(НІЦ ЗКАЕ) апаратно-програмних комплексах (зварювальних тренажерах), а також основні варіанти схемотехнічного побудування пристроїв для реалізації в тренажерних зварювальних системах резистометричного способу. Бібліогр. 17, рис. 4.

*Ключові слова:* координати плями дуги, швидкість зварювання, тренажерні зварювальні системи, імітатор зварювального виробу, пристрої контролю швидкості зварювання, датчики зварювального струму, «струмова петля»

L.M. Lobanov<sup>1</sup>, N.M. Makhlin<sup>2</sup>, A.E. Korotynsky<sup>1</sup>,  
V.Yu. Buryak<sup>2</sup>, A.G. Siparenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.  
11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.  
E-mail: office@paton.kiev.ua  
<sup>2</sup>SE «Scientific and engineering center of welding and control in the field of nuclear energy of Ukraine of E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.  
11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.  
E-mail: electro@paton.kiev.ua

#### RESISTOMETRIC METHOD OF MEASURING WELDING SPEED FOR ARC WELDING SIMULATION SYSTEMS

Some theoretical problems of resistometric method for determination of welding arc spot coordinates and evaluation of speed of electrode movement during realization or simulation of arc welding, as well as the peculiarity of creating hardware part and software of simulating welding systems are considered using this method. The examples of using this method in the hardware-software complexes (welding simulators), as well as the basic variants of circuit design of devices for realization of resistometric method in the simulating welding systems, designed and industrially manufactured at the SE «Scientific and engineering center of welding and control in the field of nuclear energy of Ukraine of the E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, are presented. 17 Ref., 4 Fig.

*Key words:* arc spot coordinates, welding speed, simulating welding systems, simulator of welded workpiece, welding speed control devices, welding current sensors, «current loop»

Поступила в редакцію 13.11.2017

#### НОВАЯ КНИГА

Лучевые технологии в сварке и обработке материалов: Сб. докл. Восьмой межд. конф. / Под ред. проф. И. В. Кривцуна. — Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2017. — 128 с. (электронное издание <http://patonpublishinghouse.com/proceedings/twmp2017.pdf>).

В сборнике представлено 23 доклада Восьмой международной конференции «Лучевые технологии в сварке и обработке материалов» (11–15 сентября 2017 г., Одесса, Украина), в которых отражены достижения за последние годы в области электронно-лучевых и лазерных технологий при сварке, наплавке, обработке материалов и в специальной электротехнологии. Авторами докладов являются известные ученые и специалисты из Украины, Беларуси, Канады, Китая, Ирана и Польши. Для научных и инженернотехнических работников.

