

ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ДУГОВОЙ СВАРКИ

А. Е. КОРОТЫНСКИЙ, М. И. СКОПОК

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Тенденцией современного этапа развития техники является ее интеллектуализация. В большей степени это относится к сварочному оборудованию, где одним из важных вопросов является интеллектуализация контроля основных параметров дуговых процессов. В предлагаемой работе рассмотрены вопросы построения многофункциональных датчиков, структуры которых унифицированы согласно стандарта IEEE 1451.4. Приведены системы измерительных уравнений, которые позволяют контролировать параметры сварки с минимальными методическими погрешностями в режиме реального времени. Библиогр. 12, табл. 1, рис. 4.

Ключевые слова: интеллектуальный датчик, многофункциональный датчик, измерительное уравнение, параметры сварки, погрешность

Общий подход в построении интеллектуальных датчиков (ИД) был предложен Дж. Бригнелем и А. Дори в 1983 г. [1]. Чувствительный элемент (ЧУ) такого типа датчика подключается к контролируемой цепи посредством коммутатора (К), который управляется встроенным микропроцессором (МП). Последний в соответствии с выбранными алгоритмами и разработанными программами управляет всеми измерительными процедурами, а также задает режимы внутреннего автоконтроля. Это может касаться контроля температуры окружающей среды, слежения за напряжением дрейфа нуля аналоговых систем и т. д. Различные архитектуры ИД подробно описаны в работе [2].

Всеобщая информатизация, которая рассматривается как один из элементов интеллектуализации общественной жизни, затронула развитие и сенсорных устройств. Если раньше результаты измерений обрабатывались почти вручную, то на современном этапе развития микропроцессорной техники вся обработка (масштабирование, калибровка, шумоподавление и т. д.) может осуществляться микропроцессорным блоком, который присоединен к чувствительному элементу (ЧЭ) сенсора. Такие устройства называют интеллектуальными сенсорами (Smart Sensors) [3, 4]. При этом к интеллектуальным сенсорам предъявляется ряд дополнительных требований. Современный сенсор, кроме ЧЭ, должен содержать средства обработки сигнала, коммутационные средства, автономное электропитание, интерфейс потребителя, средства защиты от влияния внешней среды, средства, которые позволяют идентифицировать как сам сенсор, так и его место установки (место снятия данных).

Современные тенденции построения измерительных систем направлены на создание интеллектуальных сенсоров, которые интегрированы в одном

кристалле. Такие сенсоры могут содержать целые интеллектуальные многопараметрические (многоканальные) измерительные системы (lab-on-chip) [5].

Инженеры-исследователи и проектировщики, с целью создания нужных потребителю сенсорных устройств, работают над уменьшением их стоимости, размеров и уровней потребления; улучшением метрологических параметров (чувствительность, точность, линейность и т. д.); стандартизацией процесса связи через шины интерфейсов или системы беспроводной связи; унификацией изготовления и эксплуатации посредством стандартизации.

Реальным первым шагом в направлении глобальной «интеллектуализации» датчиков можно считать международный стандарт IEEE 1451.4, который устанавливает основные требования к первичным измерительным преобразователям.

Институт электротехники и радиоэлектроники (The Institute of Electrical and Electronics Engineers — IEEE) разработал стандарт IEEE 1451.4 [6] как один из элементов комплексного протокола IEEE 1451. Одной из целей стандарта IEEE 1451 является упрощение подключения сенсоров к измерительным устройствам, средствам обработки сигналов и компьютерным сетям. Стандарт определяет набор интерфейсов и структуру программного обеспечения, а также определяет основные процедуры информационного обмена.

Блок стандартов IEEE 1451.4 регламентирует использование в составе компьютеризированных измерительных анализаторов уже существующие аналоговые измерительные преобразователи физических величин. Согласно стандарта каждый используемый измерительный преобразователь должен иметь электронный паспорт датчика (Transducer Electronic Data Sheet TEDS).

Стандарт IEEE 1451.4 для электронного спорта определяет процедуры табличных описаний сенсора (TEDS — Transducer Electronic Data Sheets), которые, кроме базовых сведений (тип сенсора, серийный номер, место установки и т. д.) может содержать таблицы калибровки и линеаризации. Блок-схема использования TEDS в интеллектуальных сенсорах и сенсорных системах показана на рис. 1.

Интерфейс датчика содержит традиционный аналоговый канал и недорогой последовательный цифровой канал, по которому осуществляется доступ к структуре TEDS. В IEEE1451.4 описывается механизм поддержки аналоговыми датчиками режима работы с самоописанием и протокол обмена по последовательному каналу. Наличие аналогового интерфейса диктуется необходимостью обеспечения совместимости ранее произведенных и установленных датчиков с технологией Plug&Play.

Основной отличительной особенностью предлагаемого подхода является использование технологии TEDS для практической реализации алгоритмов функционирования различных типов датчиков, предназначенных для контроля сварочных процессов. Дальнейшее развитие ИД с учетом требований описанного стандарта пошло по пути создания многофункциональных реконфигурируемых структур [7], а также было направлено на синтез алгоритмов их функционирования, которые бы учитывали специфику их работы в конкретной окружающей среде, например, в зоне сварочной дуги, которая создает большое количество дестабилизирующих факторов. Именно анализу алгоритмов измерения с помощью интеллектуальных многофункциональных датчиков посвящена данная работа.

Как известно, традиционно датчик рассматривался ранее как измерительное устройство, селективно обрабатывающее определенный параметр $x_1(t)$, действующий на так называемом негэнтропийном входе [8]. Остальные входы (их обычно называют энтропийными) $x_2(t)$, $x_3(t)$, ... $x_n(t)$ определяются дестабилизирующими факторами, действующими в зоне контроля. К ним относятся электромагнитные помехи, создаваемые сварочным и технологическим оборудованием, собственные электрические и магнитные шумы, тепловые поля, ионизирующие излучения и т. д. Развитие и совершенствование датчиковой аппаратуры происходило в направлении создания таких решений,

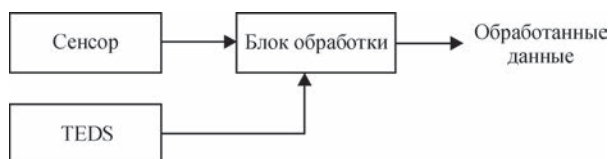


Рис. 1. Схема использования TEDS в интеллектуальных сенсорах и сенсорных системах

в которых исключалось, либо существенно уменьшалось влияние указанных факторов на конечный результат измерения.

Но в конце 1980-х годов появились результаты первых исследований, связанных с созданием многофункциональных датчиков (МФД) [9, 10], в которых часть энтропийных входов превращалась в негэнтропийные. Это существенно повысило объем и достоверность получаемой информации относительно нескольких параметров исследуемого процесса.

Аналитически задача анализа и синтеза МФД формулируется следующим образом. Пусть в основном уравнении, функционально описывающем некоторый измеряемый параметр $x_1(t)$, известен вид других контролируемых функций $x_2(t)$, ... $x_k(t)$, неучет которых ранее приводил к дополнительной погрешности измерения. Следовательно, мы приходим к системе k -уравнений, решение которой дает искомый результат по каждому j -параметру.

Метрологические возможности МФД, связанные с извлечением информации о нескольких входных параметрах, действующих в некотором сосредоточенном пространстве, делают их весьма перспективным инструментом для научных и технологических исследований. Развитие компьютерных методов измерений [11] в сочетании с МФД позволит существенно улучшить их метрологические и динамические характеристики путем реализации алгоритмов взаимной коррекции обрабатываемых параметров.

Схематическое изображение МФД приведено на рис. 2, а. Его ЧЭ способен воспринимать некоторое множество входных параметров $\{x_1, x_2, \dots, x_n\} = X_j$. Причем они могут быть различной физической природы — например, для тензорезистора входными воздействиями могут быть деформации, температуры, вибрации. Множеству входов X_j ставится в соответствие множество выходных параметров $\{y_1, y_2, \dots, y_n\} = Y_j$. Функциональная связь между ними описывается множеством коэффициентов передачи $\{k_1, k_2, \dots, k_n\} = K_j$. На рис. 2, б представлено изображение «классического» датчика, чувствительного к изменению одного параметра x_1 , остальные входы x_2, \dots, x_n (обозначены ломаной линией) являются для него энтропийными и характеризуют действие возмущений. Сумматор (Σ), используемый в датчике, на входах которого действуют все выходные сигналы ЧЭ, реализует алгоритм селекции контролируемого параметра x_1 .

Как известно [8], квазилинейный оператор преобразования для такого однопараметрического датчика описывается выражением:

$$Z(t) = k_1 x_1 f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) + b_1 \phi_1 \{x_2, x_3, \dots, x_n\} + \psi_1(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (1)$$

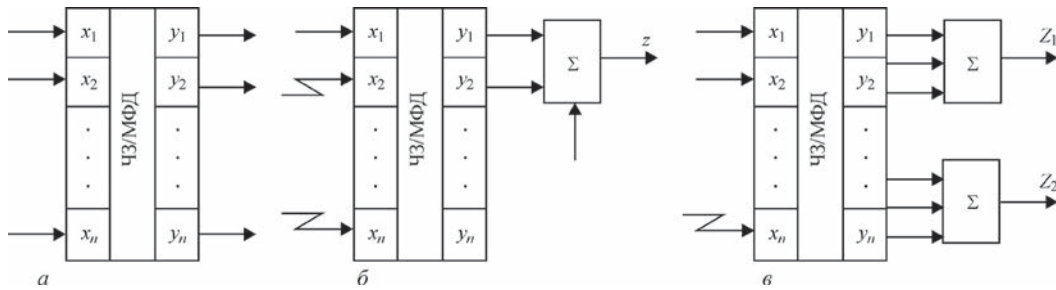


Рис. 2. Схематическое представление МФД (а), вариант классического датчика с одним ЧЭ (б), вариант двухпараметрического датчика (в)

где $Z(t)$ — функция отклика (выходной измерительный сигнал); k_1 — коэффициент передачи по контролируемому параметру; f_1 — функция влияния, учитывающая действие параметра x_1 и возмущений; φ_1 — функция, учитывающая влияние возмущений на начальный уровень сигнала; b_1 — аддитивная составляющая выходного сигнала; ψ_1 — функция дестабилизирующих факторов, учитывающая нелинейность выходной характеристики датчика.

Следовательно, для двухпараметрического МФД, схема которого приведена на рис. 2, в, система квазилинейных операторов может быть записана в виде уравнений:

$$\begin{aligned} Z_1(t) &= k_1 x_1 f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) + \\ &+ b_1 \varphi_1(x_2, x_3, \dots, x_n) + \psi_1(x_1, x_2, \dots, x_n), \\ Z_2(t) &= k_2 x_2 f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) + \\ &+ b_2 \varphi_2(x_2, x_3, \dots, x_n) + \psi_2(x_1, x_2, \dots, x_n). \end{aligned} \quad (2)$$

Совместное решение этих уравнений позволяет найти значения искоемых параметров x_1 и x_2 , информация относительно которых задается одним ЧЭ. И, соответственно, трехпараметрический МФД определяется системой уравнений:

$$\begin{aligned} Z_1(t) &= k_1 x_1 f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) + \\ &+ b_1 \varphi_1(x_2, x_3, \dots, x_n) + \psi_1(x_1, x_2, \dots, x_n), \\ Z_2(t) &= k_2 x_2 f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) + \\ &+ b_2 \varphi_2(x_2, x_3, \dots, x_n) + \psi_2(x_1, x_2, \dots, x_n), \\ Z_3(t) &= k_3 x_3 f_3(x_1, x_2, \dots, x_n) + \\ &+ b_3 \varphi_3(x_2, x_3, \dots, x_n) + \psi_3(x_1, x_2, \dots, x_n). \end{aligned} \quad (3)$$

Таким образом, как это следует из выше изложенного, выражение для общего члена системы n -уравнений, описывающей n -параметрический МФД, должно иметь вид:

$$\begin{aligned} Z_n(t) &= k_n x_n f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) + \\ &+ b_n \varphi_n(x_2, x_3, \dots, x_n) + \psi_n(x_1, x_2, \dots, x_n). \end{aligned} \quad (4)$$

Нетрудно видеть, что выражение (4) является аналитическим представлением принципа многомерной селективности МФД. Как следует из приведенных выражений (1)–(4), взаимный учет совместного влияния всех действующих факторов требует знания такого большого количества исходных данных, что решение задачи проектирования МФД в общем виде лишается практической целесообразности. Поэтому дальнейшее изложе-

ние будет относиться только к конкретным типам датчиков, особенностям их построения селективности измеряемых параметров.

Технология TEDS предусматривает формирование электронного паспорта датчика (ЭПЭ), который размещается непосредственно в чипе самого устройства. С его помощью датчик передает свои параметры системе сбора информации, к которой он подключен.

Таким образом, квазилинейный оператор любого используемого датчика, представленный в виде многочленов (1)–(4), заносится в перепрограммируемую память (ПП) для последующего использования во всех измерительных процедурах. Такой подход, в значительной мере, способствует повышению метрологических параметров МФД.

В качестве примера рассмотрим задачу разработки МФД, способного одновременно контролировать два информационных параметра (деформации и интенсивности акустической эмиссии) при испытаниях узлов трубопроводов. В настоящее время для этого используются методики контроля, основанные на измерении акусто-эмиссионного излучения в изделии, подверженного деформационному воздействию. Однако результаты идентификации этих измерений не всегда однозначны. Как показано в работе [12], более эффективные оценки параметров вибраций дает деформационный подход.

Разработанный МФД, структурная схема которого приведена на рис. 3, объединяет указанные методики виброизмерений. В качестве ЧЭ в датчике используется пьезокерамика ЦТС-21, воспринимающая механические колебания в контролируемом изделии в широком спектре частот. Для разделения деформационных сигналов $\varepsilon(t)$ и сигналов интенсивности акустической эмиссии $N_{АЭ}$

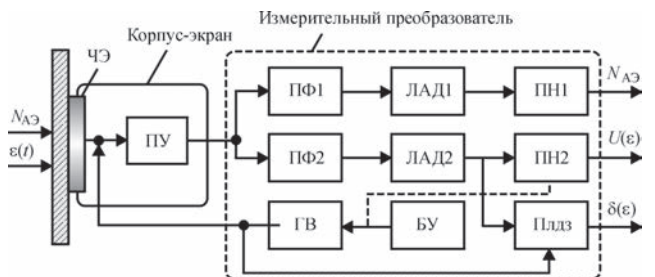


Рис. 3. Структурная схема МФД

применена частотная селекция информационных параметров. В структуре МФД можно выделить два канала — высокочастотный, используемый для регистрации $N_{\text{АЭ}}$ и низкочастотный — для измерения $\varepsilon(t)$. Функциональные блоки идентичны, а именно: полосовые фильтры (ПФ), линейные амплитудные детекторы (ЛАД) и соответствующие преобразователи напряжения (ПН). Отличительная особенность — рабочие полосы частот. В первом случае $\Delta f = 450 \dots 900$ кГц, во втором $\Delta f = 560 \dots 8500$ Гц. Канал $\varepsilon(t)$ дополнительно оснащен преобразователем логарифмического декремента затухания (ПлДЗ), вход которого подключен к выходу ЛАД2. Такое разнесение рабочих частот обеспечивает высокую степень развязки каналов измерения указанных параметров.

Поскольку процессы обработки сигналов в тракте $N_{\text{АЭ}}$ не требуют особых пояснений (предварительное усиление в блоке ПУ, фильтрация, амплитудное детектирование и регистрация в ПН1), то остановимся более подробно на описании работы тракта измерения деформаций. В его основу положен принцип измерения статических усилий, вызванных деформацией контролируемого изделия. При этом с помощью генератора возбуждения (ГВ), синхронизируемого блоком управления (БУ), на обкладку ЧЭ подается синусоидальное напряжение, частота которого соответствует резонансной частоте пьезоэлемента. Функция преобразования выходного сигнала ПУ существенно упрощается:

$$U(t) = U_m \exp(-ht) \sin \omega t, \quad (5)$$

где h — параметр, определяющий степень деформации ЧЭ; ω — частота затухающих колебаний.

Синхронное интегрирование полученного сигнала с помощью ПН2 позволяет сформировать выходное напряжение как функцию деформации: $U(\varepsilon) = f(h)$. Обратная зависимость вида $h =$

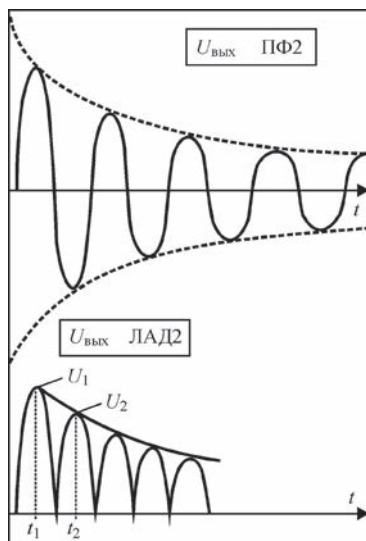


Рис. 4. Диаграммы работы измерителя ЛДЗ

$= F[U(\varepsilon)]$ может быть использована для калибровки датчика.

Описанная схема МФД, как это следует из рис. 4, позволяет определять такую важную характеристику колебательных систем как логарифмический декремент затухания (ЛДЗ):

$$d = \ln[U(t_1)/U(t_2)] = h(t_2 - t_1). \quad (6)$$

где $U(t_1)$, $U(t_2)$ — мгновенные значения напряжений, зафиксированные преобразователем ЛДЗ в соответствующие моменты времени t_1 , t_2 .

Необходимо отметить, что данный МФД имеет аппертурное время, в течение которого он не воспринимает измерительную информацию. Это время определяется периодом колебаний ГВ и составляет $\leq 0,5$ мс, а их частота $F_{\text{ГВ}} \geq 1$ Гц. В паузах сигналы могут быть восстановлены с необходимой точностью, соответствующей аппроксимирующей функцией.

МФД удобно представлять классификационной формулой, учитывающей их структурное построение. Она имеет вид:

$$\text{МФД: } \{p_i/q_j/N(A_n/D_m)\},$$

где p_i — количество контролируемых параметров, q_j — число используемых ЧЭ, N — количество аналоговых (A_n) и дискретных (D_m) выходных сигналов.

Следовательно, двухпараметрический датчик с одним ЧЭ и двумя выходными аналоговыми сигналами, изображенный на рис. 1, в, может быть задан формулой: $\{p_2/q_1/N(A_2)\}$.

В Институте электросварки им. Е. О. Патона НАНУ применительно к конкретным задачам технологического контроля разработан ряд МФД, краткая характеристика которых приведена в таблице. В таблице также приведены следующие обозначения: тип ЧЭ-ПК — пьезокерамика типа ЦТС-21; ПТП — полупроводниковый термоэлектрический преобразователь Фонон-3; ФЭП — фотоэлектрический преобразователь, R — резисторный преобразователь, ТМП — тензометрический преобразователь.

Процедура первичного измерительного преобразования в приведенных МФД осуществляется следующими устройствами: ИП — интегрирующим преобразователем; ПЕН — преобразователем емкость—напряжение; ПФ — полосовым фильтром; КМП — калориметрическим преобразователем; ПД — преобразователем давления; ВИП — время-импульсным преобразователем; МП — масштабирующим преобразователем; МПТ — мостом переменного тока и термошумометрическим преобразователем (ТШП). Выходные сигналы всех указанных преобразователей нормированы таким образом, чтобы соответствовать

Характеристики МФД

| Наименование | Назначение | Классификационная формула | Технические характеристики датчиков | | |
|--|-----------------------------------|---------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| | | | тип ЧЭ | измерительный преобразователь | форма выходного сигнала |
| МФД сварочного тока и температуры реактора* | Оснащение сварочного оборудования | $p_2/q_1/N(A_2)$ | ПК (ЦТС-21) | ИП/ПЕН | НАН/НАН |
| МФД температуры и интенсивности АЭ* | Исследование образцов | $p_2/q_1/N(A_1D_1)$ | ПК (ЦТС-21) | ПЕН/ПФ | НАН/ЧИП |
| МФД температуры и объемного расхода защитных газов | Оснащение сварочного оборудования | $p_2/q_1/N(A_2)$ | ПТП (Фонон-3) | КМП | НАН |
| МФД величины прогиба и интенсивности АЭ* | Технологические испытания | $p_2/q_1/N(A_1D_1)$ | ПК (ЦТС-21) | ПД/ПФ | НАН/ЧИП |
| МФД скорости перемещения и положения сварочной горелки* | Оснащение сварочного оборудования | $p_2/q_2/N(A_1D_1)$ | ФЭП/R | ВИП/МП | ЧИП/НАН |
| МФД сварочных деформаций, температуры и интенсивности АЭ | Технологические испытания | $p_4/q_1/N(D_3)$ | ТМП | МПТ/ТШП/ПФ | ЧИП/НАН |
| МФД температуры, проводимости и диэлектрической постоянной флюса | Исследование флюсов | $p_3/q_1/N(A_1D_2)$ | ЕП | ТШП/МПТ | НАН/ЧИП |

* Результаты по разработке МФД были впервые представлены авторами на международном семинаре Польского института сварки (Гливице) в 1997 г.

требованиям входных каналов аппаратных интерфейсов компьютеров.

В заключение следует отметить, что применение интеллектуальных МФД в сварочном оборудовании позволит значительно расширить объемы получаемой информации относительно технологических процессов, реализуемых с их помощью. Особенно важно здесь отметить возможность взаимной коррекции получаемых измерительных сигналов при одновременном контроле нескольких параметров исследуемого процесса. Это позволит в конечном счете существенно повысить точность измерений, а следовательно, и качество получаемых сварных соединений.

Список литературы

1. Brignell J. E., Dorey A. P (1983) Sensor for microprocessor – based application. *J. Phys.*, 952–958.
2. Джекон Р. Г. (2008). *Новейшие датчики*. Москва: Технофера, 398.
3. Randy F. (2002) *Understanding Smart Sensors*, Second Ed. Artech House Publishers, 412.
4. Войтович І. Д., Корсунський В. М. (2007) *Інтелектуальні сенсори*. Київ, Ін-т кібернетики ім. В. М. Глушкова НАНУ, 514.
5. Gerard C. M. Meijer. (2008) *Smart Sensors Systems*, John Wiley&Sons, Ltd, 404.
6. IEEE Standards Association (2004) IEEE Std 1451.4-2004. *Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators-Mixed-Mode Communication Protocols and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats*, Piscataway, NJ.
7. Марченко І. О. (2015) *Система проектування багатофункціональних реконфігуруємих інтелектуальних датчиків*: дис. ... канд. техн. наук, Новосибірськ.
8. Осадчий Е. П. (ред.) (1979) *Проектирование датчиков для измерения механических величин*. Москва, Машиностроение.

9. Васильев В. А., Чернов П. С. (2012). Интеллектуальные датчики, их сети и информационные системы. *Материалы Международной научно-технической конференции 3–7 декабря*, сс. 119–122.
10. Дрожжин А. И., Щетинин А. А., Седых Н. К. и др. (1977) Малогабаритные датчики температуры и деформации. *Приборы и техника эксперимента*, 5, 216–218.
11. Алейников А. Ф. (1988) *Измерительные системы с многофункциональными датчиками*: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 16.
12. Овчинников И. Н. (1986) Методика испытаний при сложном вибрационном нагружении. Заводская лаборатория, 2, 69–73.

О. Є. Коротинський, М. І. Скопюк

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.
03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: office@paton.kiev.ua

ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ

Тенденцією сучасного етапу розвитку техніки є її інтелектуалізація. Більшою мірою це відноситься до зварювального обладнання, де одним з важливих питань є інтелектуалізація контролю основних параметрів дугових процесів. У пропонуваній роботі розглянуті питання побудови багатофункціональних датчиків, структури яких уніфіковано згідно стандарту ІЕЕЕ 1451.4. Приведено системи вимірювальних рівнянь, які дозволяють контролювати параметри зварювання з мінімальними методичними похибками в режимі реального часу. Бібліогр. 12, табл. 1, рис. 4.

Ключові слова: інтелектуальний датчик, багатофункціональний датчик, вимірювальне рівняння, параметри зварювання, похибка

Поступила в редакцію 19.04.2017