



## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СВАРОЧНЫХ СВОЙСТВ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ

**Н. В. ШЕВЧЕНКО**, магистр, **И. О. СКАЧКОВ**, канд. техн. наук (НТУУ «Киевский политехнический институт»),  
**В. Е. ПОНОМАРЕВ**, канд. техн. наук (Федеральный ун-т, г. Уберландия, Бразилия)

Разработана методика контроля сварочных свойств источников питания в процессе сварки по их электрическим параметрам с помощью алгоритмов нечеткой логики. Предложены критерии оценки каждого показателя и алгоритм получения обобщенной оценки.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, источники питания, сварочные свойства, методика оценки, алгоритмы нечеткой логики

При производстве и в процессе эксплуатации сварочных источников питания существует необходимость в контроле их сварочных свойств. На сегодня источники питания должны отвечать требованиям ДСТУ 60974-1 [1], в котором не указана методика контроля сварочных свойств. Многие предприятия по-прежнему пользуются рекомендациями ГОСТ 25616–83 [2], основанными на непрямой оценке экспертным методом источников питания для ручной дуговой сварки и сварки в углекислом газе. Для этого в соответствии с требованиями стандарта привлекают двух сварщиков высокой квалификации.

Согласно данному стандарту для источников питания ручной дуговой сварки применяют дифференцированный метод контроля, оценивают следующие показатели сварочных свойств: начальное зажигание дуги, стабильность процесса сварки, разбрызгивание металла, качество формирования шва, эластичность дуги.

Показатель сварочных свойств источников питания для сварки в углекислом газе оценивают по надежности установления процесса сварки, потере металла, качеству формирования шва.

Существуют методики принятия объективных решений на основе простых расчетов по обобщенному показателю, которые учитывают вклад каждого показателя [3–5]. Недостаток их обусловлен влиянием субъективного человеческого фактора.

Возможно определение параметров всех указанных показателей по результатам учета энергетических параметров процесса сварки, а именно сварочных тока и напряжения, без участия человека. Одним из вариантов решения про-

блем влияния человеческого фактора на результат оценки является применение систем искусственного интеллекта — алгоритмов нечеткой логики (Fuzzy Logic).

Оценка каждого показателя качества заключается в отнесении его к одному из множеств: «удовлетворяет требованиям» или «не удовлетворяет требованиям». Система нечеткой логики позволяет не только оценить к какому множеству относится значение показателя качества, но и степень его принадлежности этому множеству. Для этого используют функцию принадлежности  $\mu_A: X \rightarrow [0,1]$ , которая каждому элементу  $x$  ставит в соответствие число  $\mu_A(x)$  из интервала  $[0,1]$ , где 0, 1 — соответственно низшая и высшая степень принадлежности элемента к подмножеству.

В общем случае механизм логического вывода (рис. 1) включает четыре этапа [6]:

- введение нечеткости (фазификация). Функции принадлежности, определенные на входных переменных, применяются к их фактическим значениям для нахождения степени истинности предпосылки каждого правила;
- логический вывод. Полученное значение истинности для предпосылок каждого правила применяется к заключениям каждого правила;
- композиция. Нечеткие подмножества, назначенные для каждой переменной вывода (или одной переменной), объединяются вместе для формирования одного нечеткого подмножества;
- приведение к четкости (дефазификация). Этот прием используется, когда необходимо перейти от нечеткого вывода к четкому выходному значению.



Рис.1. Система нечеткого логического вывода

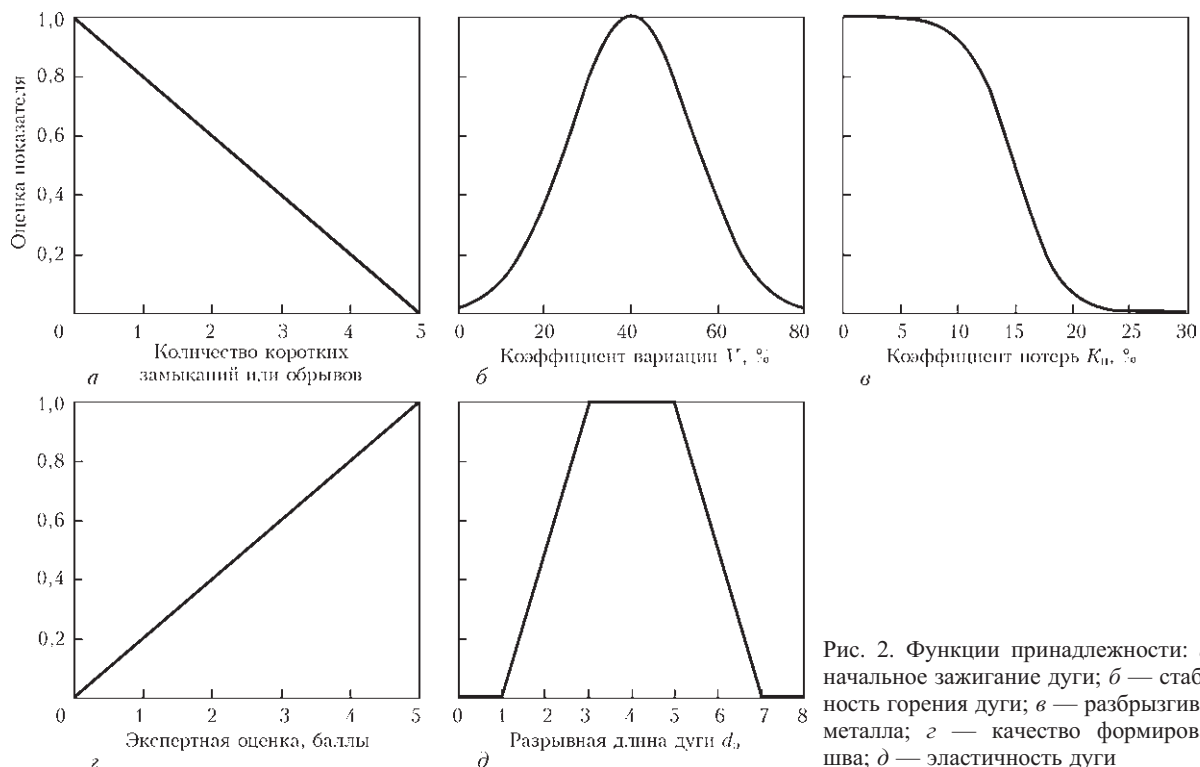


Рис. 2. Функции принадлежности: а — начальное зажигание дуги; б — стабильность горения дуги; в — разбрызгивание металла; г — качество формирования шва; д — эластичность дуги

Начальное зажигание дуги и надежность установления процесса сварки ММА и МАГ оценивали по количеству длительных коротких замыканий или обрывов дуги до установления стабильного режима. Начальное зажигание считают неудовлетворительным, если количество коротких замыканий или обрывов дуги превышает 5. Исходя из этого принимаем линейную функцию принадлежности (рис. 2, а), в которой отсутствию коротких замыканий или обрывов дуги соответствует максимальная оценка, а пяти — минимальная. Такая функция описывается следующим уравнением:

$$\text{trim } f(x) = \max\left(\frac{5-x}{5}; 0\right),$$

где  $x$  — количество продолжительных коротких замыканий или обрывов дуги.

Аналогично оценивали количество обрывов дуги в процессе сварки.

Стабильность процесса ММА сварки принято оценивать по вибрации и шуму дуги. Они в свою очередь порождаются колебаниями электрических параметров. Таким образом, шум и вибрацию дуги можно оценить по отклонениям электрических параметров дуги, а именно току и напряжению. Отклонение параметров характеризуется их коэффициентом вариации (отношением стандартного отклонения к математическому ожиданию). При ручной дуговой сварке источник питания имеет падающую внешнюю характеристику. В этом случае стабильность горения дуги целесообразно оценивать по коэффициенту вариации

напряжения на дуге. Значение коэффициента вариации при стабильном процессе сварки определяли опытным путем. Проводили сварку образцов из низкоуглеродистой стали при разных параметрах источника питания электродами АНО-21 и УОНИ-13/45. Стабильность горения оценивали экспертной оценкой сварщика. Получили зависимость коэффициента вариации напряжения от сварочного тока для ручной дуговой сварки при стабильном горении дуги. Отклонение от этого значения в меньшую или большую сторону означает ухудшение стабильности горения дуги. В таком случае можно выбрать треугольную или гауссову функцию принадлежности. Для треугольной функции оценка адекватна только при существенных отклонениях входной величины (коэффициента вариации сварочного напряжения) от оптимального значения. В случае небольших отклонений (до 10 %) оценка, полученная с помощью треугольной функции, окажется заниженной, что приведет к снижению точности работы системы в целом. Поэтому выбираем гауссову функцию принадлежности, значение которой равно 1 при оптимальном значении входной величины  $x$  для заданного режима (рис. 2, б). Уравнение такой функции принадлежности для ручной дуговой сварки на токе 100 А имеет вид

$$\text{gaussm } f(x) = \exp\left(-\left(\frac{x-40}{20}\right)^2\right),$$

где  $x$  — коэффициент вариации напряжения на дуге.

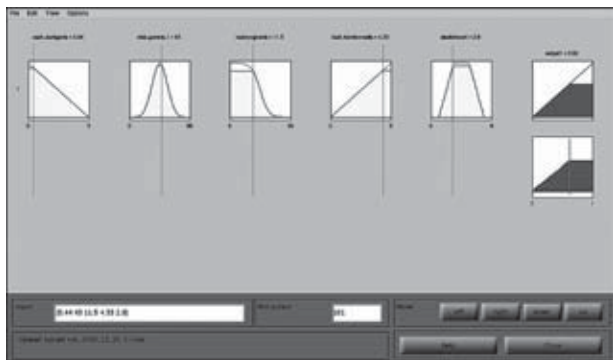


Рис. 3. Окно Fuzzy Logic toolbox с результатами работы системы оценки сварочных свойств

Потери металла оценивали по коэффициенту потерь на угар и разбрызгивание  $K_{\text{п}}$ , который определяется по формуле

$$K_{\text{п}} = \left( 1 - \frac{M_{\text{н}}}{M_{\text{р}}} \right) 100 \%,$$

где  $M_{\text{н}}$ ,  $M_{\text{р}}$  — соответственно масса наплавленного и расплавленного электродного металла.

При ручной дуговой сварке приемлемым считается коэффициент разбрызгивания до 15 % [7]. Для данного показателя качества строим сигмоидальную функцию принадлежности (рис. 2, в). Входной величине  $x$ , равной 15 %, соответствует оценка 0,5. Уравнение такой функции принадлежности имеет вид

$$\text{sigm } f(x) = \frac{1}{1 + \exp(0,5(x - 15))}.$$

Качество формирования шва определяли по внешнему виду валика и соотношению его высоты к ширине, равному среднearифметическому трех замеров, выполненных в начальной, конечной и средней его части. Оценка выставляется экспертом в баллах от 0 до 5, функция принадлежности линейная (рис. 2, г). Уравнение, описывающее данную функцию, имеет следующий вид:

$$\text{trim } f(x) = \max\left(\frac{x}{5}; 0\right),$$

где  $x$  — оценка внешнего вида шва в баллах.

Эластичность дуги оценивали по ее разрывной длине. Минимальной удовлетворительной длиной дуги считается длина, равная двум диаметрам электрода. Хорошим результатом считается длина, превышающая три диаметра электрода [2]. Однако слишком высокая эластичность дуги препятствует нормальному проведению сварки в вертикальном и потолочном положении, поэтому целесообразно установить верхнюю границу нормальной разрывной длины дуги на уровне пяти диаметров электрода (для источников питания общего назначения, если не выдвигается особых требований к эластичности дуги) [8]. Функция при-

надлежности трапецеидальная (рис. 2, д) и описывается уравнением

$$\text{trap } f(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-1}{2}; 1; \frac{x-7}{-2}\right); 0\right).$$

В целом набор функций принадлежности определяется требованиями потребителя к сварочным свойствам источников питания и условиями их эксплуатации.

Функционирование системы осуществляется по алгоритму Мамдани [6]. Весовые коэффициенты каждого входа задаются в зависимости от требований к источнику питания. Например, для ручной дуговой сварки в вертикальном или потолочном положении более весомым являются показатели начального зажигания и эластичности дуги. При этом весовые коэффициенты данных входов выше, чем у остальных. Для сварки лицевого покрытия или поверхностей с антикоррозионным покрытием выше весовой коэффициент для показателя «разбрызгивание металла» и т. д. Если не предъявляется таких дополнительных требований, то весовые коэффициенты всех входов выбираем равными 1.

Для каждого входа системы определяются уровни «отсечения» на основании базы правил:

$$\begin{aligned} &\text{«ЕСЛИ» (Вход}_1 - \Phi\Pi_1) \text{ и (Вход}_2 - \Phi\Pi_2) \text{ и} \\ &\dots \text{(Вход}_n - \Phi\Pi_n) \text{ «ТО» (Выход} - \Phi\Pi_{\text{вых}}), \end{aligned}$$

где  $\Phi\Pi_1, \dots, \Phi\Pi_n$  — функции принадлежности входов системы;  $\Phi\Pi_{\text{вых}}$  — функция принадлежности выхода системы.

Далее находятся усеченные функции принадлежности. С использованием операции  $\text{prod}$  проводится объединение найденных усеченных функций, что приводит к получению итогового нечеткого подмножества для переменной выхода. Заключительным этапом является определение четкого значения выходной переменной по методу первого максимума. Функцию принадлежности для выхода приняли линейной; 0 — когда произведение оценок всех входов равно 0; 1 — когда произведение равно 1. Обобщенная оценка всех сварочных свойств определяется как

$$\gamma = \prod_{n=1}^N x_n^{\varepsilon_n},$$

где  $N$  — количество показателей сварочных свойств;  $\varepsilon_n$  — весомость  $n$ -го показателя;  $x_n$  — значение оценки каждого показателя.

В результате получили обобщенную оценку сварочных свойств источника питания, которая находится в интервале  $[0, 1]$  (рис. 3). Оценка нелинейная. Анализ показал, что традиционной оценке «отлично» соответствует значение обобщенной оценки в интервале  $0,51 \dots 1$ , «хорошо» —  $0,28 \dots 0,5$ , «удовлетворительно» —  $0,17 \dots 0,27$ ,

**Таблица 1.** Результаты оценки сварочных свойств источника питания «Fronius TPS 5000» автоматизированной системой

Параметр	Среднее значение параметра	Оценка автоматизированной системой
Начальное зажигание дуги (количество коротких замыканий)	0,44	0,912
Стабильность процесса сварки (коэффициент вариации напряжения)	0,43	0,977
Разбрызгивание металла, %	11,5	0,852
Качество формирования шва (экспертная оценка)	4,33	0,866
Эластичность дуги (диаметров электрода)	2,90	0,950
Обобщенная оценка		0,62 (отлично)

**Таблица 2.** Сравнение результатов оценки сварочных свойств (средние значения показателей по результатам наплавки нескольких валиков)

Параметр	Оценка автоматизированной системой	Средняя оценка сварщика 1	Средняя оценка сварщика 2
Начальное зажигание дуги	4,6	4,5	5,0
Стабильность процесса сварки	4,9	4,0	4,0
Разбрызгивание металла	4,3	4,4	4,7
Качество формирования шва	4,3	4,1	4,0
Эластичность дуги	4,8	4,7	4,6

«неудовлетворительно» — 0...0,26. Построение системы оценки сварочных свойств проводили в среде MatLab.

Проверку работы системы проводили путем сравнения результатов оценки инверторного источника питания «Fronius TPS 5000» двумя методами: в соответствии со стандартом ГОСТ 25616–83 с привлечением двух сварщиков высокой квалификации и с использованием разработанной автоматизированной системы. Оценку проводили для условий ручной дуговой сварки. Для регистрации сварочных тока и напряжения применяли цифровую систему сбора и регистрации данных, состоящую из датчиков тока и напряжения на основе эффекта Холла, аналогово-цифрового преобразо-

вателя и персонального компьютера. Записи и анализ осциллограмм проводили с использованием программы PowerGraph.

В результате получили оценку каждого сварочного свойства и обобщенную оценку автоматизированной системой (табл. 1). Для сравнения результатов автоматизированной системы с результатами оценки сварщиками полученные данные перевели в шкалу, регламентированную ГОСТ 25616–83 (табл. 2). Для перевода результат умножали на 5. Оценку сварочных свойств проводили согласно программе испытаний, приведенной в стандарте.

## Выводы

1. Задача определения взвешенных многокритериальных оценок показателей качества источников питания может быть решена применением автоматизированных систем на основе алгоритмов нечеткой логики.

2. Использование нечеткой логики и компьютерных систем сбора и обработки данных дает возможность создания гибких систем для оценки сварочных свойств источников питания для дуговой сварки в автоматизированном режиме. Это позволяет свести к минимуму влияние человеческого фактора на оценку сварочных свойств.

1. ДСТУ 60974-1-2003. Обладнання для дугового зварювання. — Ч.1. Джерела живлення для зварювання. — Чинний з 01.07.2004.
2. ГОСТ 25616–83. Источники питания для дуговой сварки. Методы испытаний сварочных свойств. — Введ. 28.01.83.
3. Троцкий В. А. Элементы дефектологии // Неразрушающие методы контроля сварочных соединений. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1981. — 186 с.
4. Методика комплексной оценки сварочно-технологических свойств источников питания / И. К. Походня, В. Е. Пономарев, И. И. Заруба, А. М. Жерносеков // Новые сварочные источники питания. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 1992. — 144 с.
5. Троцкий В. А. Количественная оценка уровня качества сварочных процессов и оборудования // Автомат. сварка. — 1983. — № 4. — С. 62–66.
6. Кричевский М. Л. Интеллектуальный анализ данных в менеджменте: Уч. пособие. — С.-Пб: СПбГУАП, 2005. — 208 с.
7. Жизняков С. Н., Сидлин З. А. Ручная дуговая сварка. Материалы. Оборудование. Технология. — Киев: Екотехнология, 2006. — 368 с.
8. Scotti A., Ponomarev V. Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho. — SanPaulo: Artliber Editora, 2008. — 284 p.

Method for in-process monitoring of welding properties of power supplies by their electric parameters was developed. The method is based on estimation of indicators of welding properties by using fuzzy logic algorithms. Criteria for estimation of each indicator and an algorithm for obtaining a generalised estimate are proposed.

Поступила в редакцию 25.09.2009