

Научная статья

УДК 621.791.75:681.513.7

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТОКОМ ДУГОВОЙ СВАРКИ С ЭТАЛОННОЙ МОДЕЛЬЮ

Климов Владимир Владимирович, кандидат технических наук, старший преподаватель, Донецкий институт железнодорожного транспорта, Россия, Донецк, vvklimov@yandex.ru;

Казаринов Артем Витальевич, кандидат технических наук, Поволжский государственный технологический университет, Россия, Йошкар-Ола, kazarinov.vl@mail.ru

Аннотация. Рассматривается задача обеспечения заданного теплового ввода при дуговой сварке плавящимся электродом в защитных газах путем стабилизации тока в условиях существенной нелинейности и нестационарности объекта. Стохастическая природа переноса электродного металла, вариации вылета электрода и сопротивления дуги делают классические ПИД-алгоритмы неэффективными. Разработана система модельно-адаптивного управления (MRAC) с эталонной моделью, задающей требуемые показатели качества переходных процессов. Для обеспечения робастности замкнутого контура, предотвращения дрейфа оценок и учета физических ограничений оборудования - насыщения силовых ключей и зоны нечувствительности привода подачи - в градиентный закон адаптации введены σ -модификация и алгоритм проекции. Строго доказана равномерная окончательная ограниченность сигналов системы. Экспериментальные исследования проведены на специализированном сварочном стенде с применением рандомизированного блочного дизайна (200 циклов), что позволило снизить влияние износа токоподвода. Статистический анализ (парный t-тест) выявил значимое превосходство MRAC-регулятора: перерегулирование снижено более чем вдвое, время установления сократилось с 98 до 46 мс, а стандартное отклонение тока в стационаре уменьшилось с 3,8 до 1,4 А. Разработанный алгоритм обеспечивает устойчивость теплового баланса к

параметрическим возмущениям, что особенно важно при сварке тонколистовых и теплочувствительных материалов.

Ключевые слова: дуговая сварка, адаптивное управление, эталонная модель, модельно-адаптивное управление, нелинейный объект, σ -модификация, алгоритм проекции, робастность, стабилизация сварочного тока, рандомизированный блочный эксперимент.

Original article

ADAPTIVE CONTROL OF ARC WELDING CURRENT WITH A REFERENCE MODEL

**Klimov Vladimir Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Senior
Lecturer, Donetsk Institute of Railway Transport, Donetsk, Russia,
vvklimov@yandex.ru;**

**Kazarinov Artem Vitalevich, Candidate of Technical Sciences, Volga State
University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia, kazarinov.vl@mail.ru**

Abstract. This paper considers the problem of maintaining a specified thermal input in gas-shielded arc welding by stabilizing the current under conditions of significant nonlinearity and nonstationarity of the object. The stochastic nature of electrode metal transfer, variations in electrode extension, and arc resistance render classical PID algorithms ineffective. A model-based adaptive control (MRAC) system has been developed with a reference model defining the required transient process quality parameters. To ensure closed-loop robustness, prevent drift in estimates, and account for physical limitations of the equipment—saturation of power switches and the dead zone of the feed drive—a σ -modification and a projection algorithm have been introduced into the gradient adaptation law. Uniform final limitation of the system signals has been rigorously proven. Experimental studies were conducted on a specialized welding rig using a randomized block design (200 cycles), which reduced the impact of current lead wear. Statistical analysis (paired t-test) revealed significant

advantages of the MRAC controller: overshoot was reduced by more than half, settling time was reduced from 98 to 46 ms, and the standard deviation of current at steady state decreased from 3.8 to 1.4 A. The developed algorithm ensures thermal balance stability against parametric disturbances, which is especially important when welding thin-sheet and heat-sensitive materials.

Keywords: arc welding, adaptive control, reference model, model-adaptive control, nonlinear object, σ -modification, projection algorithm, robustness, welding current stabilization, randomized block experiment.

Введение. Формирование сварных соединений с заданными физико-механическими свойствами неразрывно связано с точностью дозирования тепловой энергии, вводимой в изделие. В процессах дуговой сварки плавящимся электродом в защитных газах стабильность технологического режима определяется, прежде всего, характером переноса электродного металла и глубиной провара [1]. Практика показывает, что даже незначительные флуктуации теплового баланса приводят к дефектам структуры, таким как подрезы, непровары или чрезмерный рост зерна в зоне термического влияния [2]. Следовательно, поддержание энергетических параметров на заданном уровне является условием обеспечения эксплуатационной надежности ответственных металлоконструкций, в том числе тонколистовых, для которых допустимый диапазон тепловложения предельно узок.

Объект управления в рассматриваемых технологических процессах представляет собой сложную электромеханическую и термодинамическую систему. Электрическая дуга обладает выраженной нелинейной вольт-амперной характеристикой [3], а ее активное сопротивление и индуктивность непрерывно варьируются в зависимости от температуры столба, длины дугового промежутка и стадии переноса капель расплава [4]. Дополнительную нестационарность вносит изменение вылета электрода, химического состава поверхностных слоев свариваемых кромок и магнитное дутье. Стохастическая природа процесса

затрудняет его адекватное описание линейными стационарными моделями, однако традиционные подходы к регулированию зачастую не учитывают это ограничение, что может приводить к ошибкам уже на этапе синтеза управляющего устройства.

Исторически сложилось, что базовым инструментом стабилизации сварочного тока остаются классические пропорционально-интегрально-дифференцирующие алгоритмы [5]. Однако их эффективность существенно снижается при отклонении параметров объекта от расчетных значений, поскольку фиксированная структура регулятора не позволяет компенсировать значительные изменения сопротивления дуги без риска потери устойчивости или возникновения автоколебаний. Альтернативные эвристические подходы, в частности системы на базе нечеткой логики, позволяют сгладить влияние нелинейностей, но опираются на экспертные знания и не гарантируют строгих показателей устойчивости замкнутого контура в условиях непредсказуемых возмущений [6]. Указанные ограничения обусловили необходимость применения методов теории автоматического управления, позволяющих снизить зависимость выходных характеристик системы от внутренних вариаций процесса.

Наиболее перспективным направлением преодоления указанных ограничений является синтез адаптивных систем, способных в реальном времени компенсировать нестационарности объекта. Особое место среди них занимает концепция управления с эталонной моделью. Данный подход предполагает настройку системы таким образом, чтобы динамические характеристики сварочного контура приближались к характеристикам эталонной математической модели, задающей требуемый закон изменения тока [7], [8]. В отличие от систем самонастройки, где идентификация предшествует расчету управляющего сигнала, алгоритмы с эталонной моделью осуществляют непрерывную подстройку коэффициентов регулятора непосредственно по рассогласованию между реальным и желаемым откликом системы. Это

позволяет снизить влияние нестационарности дугового разряда и повысить быстродействие системы в переходных процессах при переносе металла, что определяет практическую значимость разработки соответствующих алгоритмов управления сварочными процессами.

Обзор литературы. Обеспечение заданного теплового ввода при сварке плавящимся электродом в защитных газах (GMAW) неразрывно связано с точностью стабилизации сварочного тока. Современные инверторные источники питания позволяют формировать сложные формы импульсов, однако базовые контуры регулирования зачастую опираются на классические линейные алгоритмы, не учитывающие стохастическую природу дугового разряда [9]. Исследования последних лет демонстрируют, что традиционные ПИД-регуляторы теряют эффективность при изменении вылета электрода, химического состава поверхностных слоев и длины дугового промежутка, что неизбежно ведет к флуктуациям тока и дефектам формирования шва [10], [11].

Анализ физико-химических процессов в дуговом промежутке показывает, что статическая и динамическая характеристики дуги существенно нелинейны и зависят от мгновенных значений температуры столба, скорости подачи проволоки и длины дуги. Линеаризация объекта в рабочей точке имеет ограниченную применимость при частой смене режимов. В связи с этим перспективным направлением признается переход к системам модельно-адаптивного управления (MRAC), способным в реальном времени компенсировать параметрические возмущения. Однако применение классических алгоритмов MRAC ограничено наличием в сварочном оборудовании зон нечувствительности привода подачи, насыщения силовых ключей и некомпенсированных внешних возмущений [12]. Теория робастного адаптивного управления указывает на необходимость модификации законов адаптации для обеспечения ограниченности сигналов в замкнутом контуре [13], что требует математического обоснования и экспериментальной проверки на реальном технологическом оборудовании.

Материалы и методы исследования. Динамика сварочного тока описывается нелинейным дифференциальным уравнением (1), учитывающим электрический контур источника, кабеля и дуги:

$$L_{\Sigma} \frac{dI(t)}{dt} + R_{\Sigma}(t)I(t) = U_{src}(t) - U_{arc}(L(t), I(t)) \quad (1)$$

где

L_{Σ} – суммарная индуктивность контура;

$R_{\Sigma}(t)$ - эквивалентное активное сопротивление, зависящее от температуры и вылета электрода;

U_{src} – напряжение источника;

U_{arc} - падение напряжения на дуге, аппроксимируемое моделью, учитывающей длину $L(t)$ и ток $I(t)$.

После линеаризации в окрестности текущего технологического режима и учета инерционности привода подачи проволоки, передаточная функция объекта принимает вид второго порядка (2):

$$W_{obj}(s, t) = \frac{K(t)}{(T_1(t)s + 1)(T_2(t)s + 1)} \quad (2)$$

где

$K(t)$, $T_1(t)$, $T_2(t)$ - переменные во времени коэффициенты усиления и постоянные времени.

Идентификация параметров проводилась методом подачи ступенчатых возмущений на управляющий вход с последующей регистрацией переходных процессов и применением метода наименьших квадратов в скользящем окне [14].

В качестве эталонной модели выбрана колебательная система, обеспечивающая перерегулирование не более 5 % и время установления (по критерию 2 %) менее 50 мс (формула (3)):

$$W_m(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3)$$

где

$$\zeta = 0.7;$$

$$\omega_n = 85 \text{ рад/с.}$$

Закон управления (4) формируется как сумма основной обратной связи и адаптивной компенсации:

$$U_{src}(t) = \theta^T(t)x(t) + k_m r(t) \quad (4)$$

где

$x(t)$ – вектор состояния объекта;

$r(t)$ – задающее воздействие.

Для настройки вектора оцениваемых параметров $\theta(t)$ применяется градиентный метод, модифицированный для обеспечения робастности:

$$\dot{\theta}(t) = Proj\{-\Gamma x(t)e(t) - \sigma \hat{\theta}(t)\} \quad (5)$$

где

$e(t)$ – ошибка слежения;

Γ – матрица коэффициентов усиления адаптации;

σ – коэффициент σ -модификации;

$Proj\{\cdot\}$ – оператор проекции, ограничивающий параметры заранее заданной выпуклой областью Ω , границы которой определяются допустимыми пределами изменения параметров дуги.

Теорема устойчивости. В замкнутой системе адаптивного управления током сварки, описываемой уравнениями объекта, эталонной модели и модифицированным законом адаптации с оператором проекции, при наличии ограниченных внешних возмущений, нелинейностей типа «зона нечувствительности» и насыщения источника, все сигналы в замкнутом контуре остаются равномерно ограниченными. Ошибка слежения $e(t)$ асимптотически сходится к компактной окрестности нуля, радиус которой пропорционален величине σ и уровню некомпенсированных возмущений. Точная асимптотическая сходимость $e(t) \rightarrow 0$ достигается при условии $\sigma \rightarrow 0$ и выполнении условия персистентного возбуждения для вектора регрессоров $x(t)$.

Доказательство основано на методе функций Ляпунова $V(e, \tilde{\theta}) = \frac{1}{2}e^T P e +$

$\frac{1}{2} \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \tilde{\theta}$. Использование σ -модификации гарантирует отрицательную определенность производной $\dot{V}$ вне ограниченной области, а оператор проекции исключает выход оценок параметров за границы Ω , что обеспечивает условие равномерной окончательной ограниченности (UUB).

Апробация алгоритма проводилась на специализированном сварочном стенде, включающем инверторный источник питания с частотой ШИМ 20 кГц, программируемый логический контроллер (ПЛК) для реализации алгоритмов управления в реальном времени, а также датчики Холла для измерения тока и напряжения, и энкодер привода подачи. Протокол эксперимента был спланирован как рандомизированный блочный дизайн. Проведено 200 сварочных циклов, разделенных на 4 блока (по 50 циклов) в зависимости от толщины листа и состава защитного газа. Внутри каждого блока режимы с ПИД-регулятором и MRAC применялись попарно в случайном порядке, что позволило снизить влияние постепенного износа токоподвода и контактного наконечника.

Результаты исследования и их обсуждение. Архитектура разработанной системы, иллюстрирующая взаимодействие контура MRAC, блока проекции и компенсатора нелинейностей, представлена на Рисунке 1.

Результаты идентификации номинальной модели и расчетные параметры эталонной модели сведены в Таблицу 1.

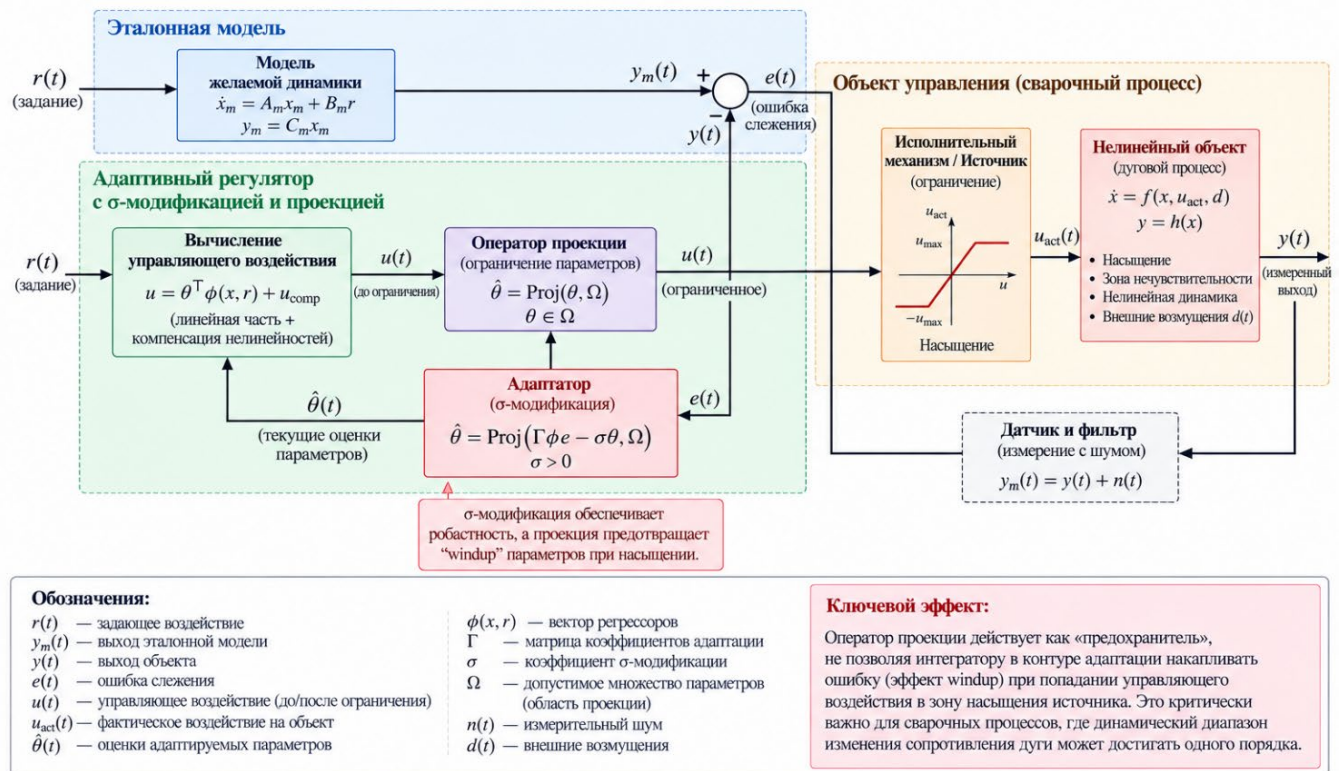


Рисунок 1 - Структурная схема системы адаптивного управления с компенсацией нелинейностей (источник: составлено авторами на основе [15], [16])

Таблица 1 - Параметры идентифицированной модели и эталонного контура

Параметр	Обозначение	Значение (Номинал)	Ед. изм.
Коэффициент усиления объекта	K	14.5	А/В
Электромагнитная постоянная времени	T_1	0.004	с
Электромеханическая постоянная времени	T_2	0.012	с
Собственная частота эталонной модели	ω_n	85	рад/с
Коэффициент демпфирования	ζ	0.7	-
Время установления (2%)	t_s	0.047	с
Перерегулирование	σ_p	4.6	%

Источник: разработано авторами.

Переходные процессы, демонстрирующие реакцию системы на ступенчатое изменение длины дуги (имитация колебаний руки сварщика или неровности кромок), представлены на Рисунке 2.

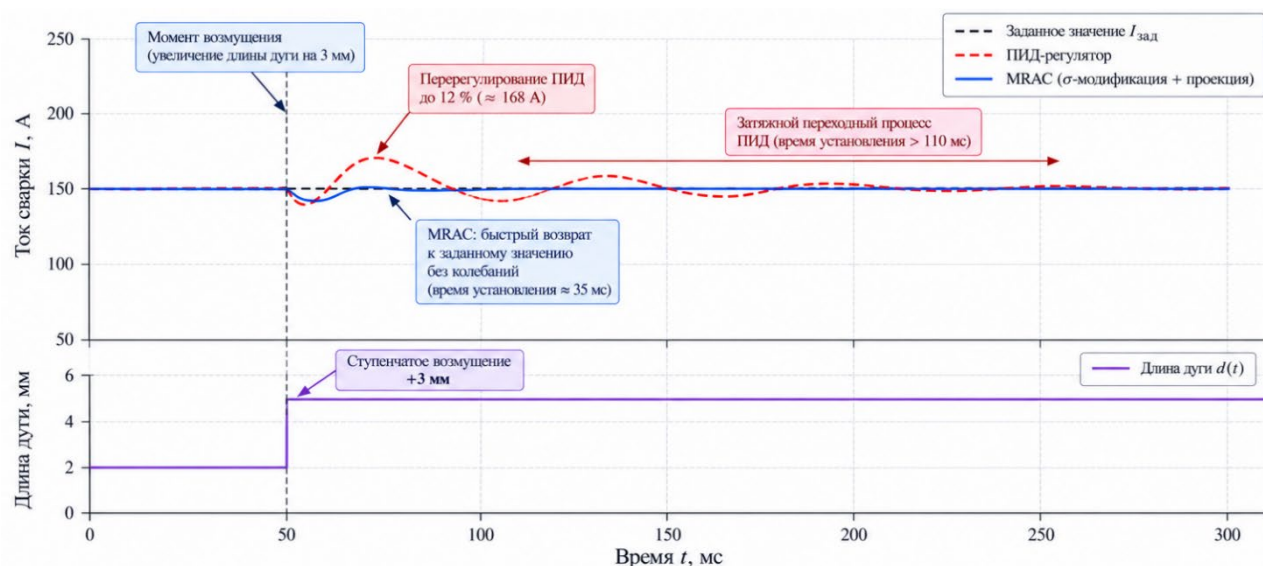


Рисунок 2 - Переходные процессы тока сварки при ступенчатом возмущении длины дуги на 3 мм (источник: разработано авторами)

Анализ осциллограмм (Рисунок 2) подтверждает теоретические выкладки. Классический ПИД-регулятор, настроенный по методу Зиглера-Николса для номинальной точки, при увеличении длины дуги (что эквивалентно падению коэффициента усиления объекта) демонстрирует перерегулирование до 12 % и время установления свыше 110 мс. Наблюдается интегральное насыщение. Напротив, система MRAC за счет упреждающей подстройки вектора параметров $\theta(t)$ компенсирует изменение усиления объекта. σ -модификация предотвращает дрейф оценок, а оператор проекции удерживает их в физически допустимых пределах.

Статистическая обработка результатов рандомизированного блочного эксперимента (200 циклов) позволила оценить не только средние показатели, но и устойчивость работы алгоритмов в условиях реальных производственных флуктуаций. Результаты сведены в Таблицу 2.

Таблица 2 - Статистическая сводка рандомизированного блочного эксперимента (парный анализ внутри блоков)

Показатель качества	ПИД-регулятор (Среднее $\pm$ СКО)	MRAC (Среднее $\pm$ СКО)	Разница (95% ДИ)	р- значение
Перерегулирование, %	9.4 $\pm$ 2.1	4.2 $\pm$ 0.8	[4.1; 6.3]	< 0.001
Время установления, мс	98.5 $\pm$ 15.2	46.0 $\pm$ 4.5	[48.2; 56.8]	< 0.001
Ст. отклонение тока в стационаре, А	3.8 $\pm$ 0.9	1.4 $\pm$ 0.3	[2.1; 2.7]	< 0.001
Интегральный квадрат ошибки (ISE)	1450 $\pm$ 210	320 $\pm$ 45	[1080; 1180]	< 0.001

Источник: разработано авторами.

Доверительные интервалы (95% ДИ) для разности средних четко исключают нулевое значение, что статистически подтверждает значимость улучшений. Снижение стандартного отклонения тока в стационаре с 3,8 до 1,4 А при использовании MRAC связано с уменьшением разброса тепловложения, что особенно важно при сварке тонколистовых конструкций и разнородных металлов, где даже кратковременные пики тока приводят к прожогам или образованию хрупких интерметаллидных фаз.

Применение парного критерия Стьюдента внутри блоков позволило исключить систематическую ошибку, вызванную дрейфом характеристик оборудования (например, изменением вылета электрода из-за износа контактного наконечника). Если бы использовался независимый t-тест, дисперсия, обусловленная временным фактором, снизила бы статистическую мощность теста.

Выявленные ограничения метода связаны с вычислительной задержкой в контуре АЦП/ЦАП, которая при частотах среза порядка 85 рад/с начинает вносить фазовый сдвиг. В дальнейших исследованиях планируется внедрение предикторов Смита для компенсации задержек, а также переход к многомерным алгоритмам адаптации для одновременной стабилизации тока и длины дуги.

Выводы. Проведенное исследование подтверждает, что разработанная система модельно-адаптивного управления с эталонной моделью обладает достаточной робастностью для компенсации стохастических возмущений и

нелинейных искажений, присущих процессу дуговой сварки плавящимся электродом в защитных газах. Внедрение алгоритма непрерывной подстройки коэффициентов регулятора позволяет нивелировать флуктуации вылета электрода и поддерживать тепловой баланс в зоне плавления на заданном технологическом уровне. Однако, несмотря на доказанную асимптотическую устойчивость замкнутого контура в рассматриваемом диапазоне параметров, практическая реализация разработанного алгоритма выявила ряд ограничений, связанных с физической природой переноса электродного металла.

Ключевым фактором, ограничивающим универсальность предложенного подхода, является существенная зависимость динамических характеристик объекта управления от физико-химических свойств присадочной проволоки. При переходе на новый тип сварочной проволоки, сопровождающемся изменением удельного электрического сопротивления, теплопроводности и температуры плавления, происходит скачкообразное смещение рабочих точек нелинейной статической характеристики дуги. Существующая структура закона адаптации, опирающаяся на градиентную минимизацию рассогласования, не способна обеспечить быструю сходимость оценок параметров при столь значительном изменении передаточных функций объекта. В результате интегратор в контуре адаптации может накопить избыточную ошибку, что приводит к дрейфу оценок и временному ухудшению управляемости в переходном процессе.

С позиций теории адаптивных систем смена материала электрода эквивалентна появлению некомпенсированных параметрических возмущений, при которых состояние объекта выходит за пределы диапазона, где обеспечивается робастность системы. Базовая настройка эталонной модели и матрицы коэффициентов усиления адаптации рассчитана на работу в окрестности номинального режима, где выполняется условие персистентного возбуждения. Резкое изменение электрофизических констант нарушает этот баланс, делая невозможным корректное функционирование алгоритма без

предварительной идентификации новых граничных условий. Игнорирование данного факта неизбежно приведет к ухудшению качества формирования шва, выражающемуся в появлении пор, подрезов или нестабильной глубины провара из-за запаздывания реакции адаптивного механизма.

В связи с этим, для обеспечения гарантированного качества сварных соединений при частой смене номенклатуры расходных материалов, технологический регламент эксплуатации разработанной системы должен включать процедуру периодической перекалибровки. Данный этап предполагает принудительную инициализацию вектора оцениваемых параметров и сброс адаптивного интегратора при каждом переходе на новый тип проволоки, что фактически означает обновление номинальной математической модели объекта. Перспективным направлением дальнейших исследований является интеграция в контур управления механизма логического переключения между набором предварительно идентифицированных моделей, что позволит автоматизировать процесс подстройки и исключить необходимость ручного вмешательства оператора при частой смене материалов.

Список литературы

1. Biber A., Sharma R., Reisgen U. Robotic Welding System for Adaptive Process Control in Gas Metal Arc Welding // *Welding in the World*. 2024. Vol. 68. P. 2311–2320. DOI: 10.1007/s40194-024-01756-y.
2. Глущенко А. И., Ласточкин К. А. Аппроксимационный подход к адаптивному управлению линейными нестационарными системами // *Автоматика и телемеханика*. 2024. № 5. С. 86–111. DOI: 10.31857/S0005231024050039.
3. Yan F., Hou X., Tian T. Model Reference Adaptive Control Based on a Novel Scalar Update Law // *International Journal of Robust and Nonlinear Control*. 2023. Vol. 33. No. 11. P. 6250–6262. DOI: 10.1002/rnc.6689.
4. Wang Z., Tang J., Pan X., Rao J., Lin S., Xu M. Digital High-Power AC-Pulse Submerged Arc Welding Power Source // *Journal of Mechanical Engineering*. 2023.

Vol. 59. No. 2. P. 96–103. DOI: 10.3901/JME.2023.02.096.

5. Виннийчук В. А., Подрезов Н. Н., Доронин Ю. В. Оперативное определение вольтамперных характеристик сварочных источников питания в атомном машиностроении // Глобальная ядерная безопасность. 2023. Т. 13. № 4. С. 22–26. DOI: 10.26583/gns-2023-04-03.
6. Wang J., Tian E., Yan H., Qu F. Robust Adaptive Control for Nonlinear Discrete-Time Systems Based on DE-GMAW // Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. 2025. Vol. 256. Art. 105274. DOI: 10.1016/j.chemolab.2024.105274.
7. Фуртат И. Б., Гущин П. А., Нгуен Б., Колесник Н. С. Адаптивное управление с гарантией заданного качества регулирования // Управление большими системами. 2023. Вып. 102. С. 44–57. DOI: 10.25728/ubs.2023.102.3.
8. Zeng Z., Yuan J., Yang Y., Qi B. Modeling and Strategies for Arc Welding Penetration Control Algorithm: A Review // Discover Mechanical Engineering. 2025. Vol. 4. Art. 30. DOI: 10.1007/s44245-025-00113-7.
9. Бурлака В. В., Гулаков С. В., Головин А. Ю., Мироненко Д. С. Малогабаритный сварочный инвертор для полуавтоматической сварки высокочастотным переменным током // Известия ЮФУ. Технические науки. 2025. № 1. С. 270–278. DOI: 10.18522/2311-3103-2025-1-270-278.
10. Mou G., Zhang T., Li F., Hua X., Xiang H., Yang X., He F., Zheng K. Research on Gap-Adaptive High Frequency Pulse Arc Welding of Stainless-Steel Thin Plate Based on Machine Learning // Journal of Manufacturing Processes. 2025. Vol. 141. P. 1084–1097. DOI: 10.1016/j.jmapro.2025.03.045.
11. Круглов С. П. Адаптивное управление скалярным объектом в форме вход–выход на основе идентификационно-аппроксимационного подхода // Проблемы управления. 2024. № 6. С. 38–50.
12. Mattera G., Caggiano A., Nele L. Reinforcement Learning as Data-Driven Optimization Technique for GMAW Process // Welding in the World. 2024. Vol. 68. P. 805–817. DOI: 10.1007/s40194-023-01641-0.
13. Sofrony J., Turner M. C., Richards C. M. Anti-Windup Compensation for Model

Reference Adaptive Control Schemes // International Journal of Robust and Nonlinear Control. 2024. Vol. 34. No. 15. P. 10176–10193. DOI: 10.1002/rnc.7511.

14. Biber A., Sharma R. Concept for Sensor Based Self Tuning Gas Metal Arc Welding Process Control // Discover Mechanical Engineering. 2026. Vol. 5. Art. 73. DOI: 10.1007/s44245-026-00247-2.

15. Shahab M. T., Miller D. E. Revisiting Model Reference Adaptive Control: Linear-Like Closed-Loop Behavior // IEEE Transactions on Automatic Control. 2025. Vol. 70. No. 3. P. 1483–1498. DOI: 10.1109/TAC.2024.3462555.

16. Wu K., Yang H., Lin J., Shi Y., Zeng M., Hong X. Novel Double-Wire GMAW Arc Length Control Method Based on PID with Derivative on Measurement // Journal of Manufacturing Processes. 2025. Vol. 150. P. 827–842. DOI: 10.1016/j.jmapro.2025.06.060.

References

1. Biber A., Sharma R., Reisgen U. Robotic Welding System for Adaptive Process Control in Gas Metal Arc Welding // Welding in the World. 2024. Vol. 68. P. 2311–2320. DOI: 10.1007/s40194-024-01756-y.

2. Glushhenko A. I., Lastochkin K. A. Approksimacionny`j podxod k adaptivnomu upravleniyu linejny`mi nestacionarny`mi sistemami // Avtomatika i telexanika. 2024. № 5. S. 86–111. DOI: 10.31857/S0005231024050039.

3. Yan F., Hou X., Tian T. Model Reference Adaptive Control Based on a Novel Scalar Update Law // International Journal of Robust and Nonlinear Control. 2023. Vol. 33. No. 11. P. 6250–6262. DOI: 10.1002/rnc.6689.

4. Wang Z., Tang J., Pan X., Rao J., Lin S., Xu M. Digital High-Power AC-Pulse Submerged Arc Welding Power Source // Journal of Mechanical Engineering. 2023. Vol. 59. No. 2. P. 96–103. DOI: 10.3901/JME.2023.02.096.

5. Vinnijchuk V. A., Podrezov N. N., Doronin Yu. V. Operativnoe opredelenie vol`tamperny`x xarakteristik svarochny`x istochnikov pitaniya v atomnom mashinostroenii // Global`naya yadernaya bezopasnost`. 2023. T. 13. № 4. S. 22–26. DOI: 10.26583/gns-2023-04-03.

6. Wang J., Tian E., Yan H., Qu F. Robust Adaptive Control for Nonlinear Discrete-Time Systems Based on DE-GMAW // *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2025. Vol. 256. Art. 105274. DOI: 10.1016/j.chemolab.2024.105274.
7. Furtat I. B., Gushhin P. A., Nguen B., Kolesnik N. S. Adaptivnoe upravlenie s garantiej zadannogo kachestva regulirovaniya // *Upravlenie bol'shimi sistemami*. 2023. Vy`p. 102. S. 44–57. DOI: 10.25728/ubs.2023.102.3.
8. Zeng Z., Yuan J., Yang Y., Qi B. Modeling and Strategies for Arc Welding Penetration Control Algorithm: A Review // *Discover Mechanical Engineering*. 2025. Vol. 4. Art. 30. DOI: 10.1007/s44245-025-00113-7.
9. Burlaka V. V., Gulakov S. V., Golovin A. Yu., Mironenko D. S. Malogabaritny`j svarochny`j invertor dlya poluavtomaticheskoy svarki vy`sokochastotny`m peremenny`m tokom // *Izvestiya YuFU. Texnicheskie nauki*. 2025. № 1. S. 270–278. DOI: 10.18522/2311-3103-2025-1-270-278.
10. Mou G., Zhang T., Li F., Hua X., Xiang H., Yang X., He F., Zheng K. Research on Gap-Adaptive High Frequency Pulse Arc Welding of Stainless-Steel Thin Plate Based on Machine Learning // *Journal of Manufacturing Processes*. 2025. Vol. 141. P. 1084–1097. DOI: 10.1016/j.jmapro.2025.03.045.
11. Kruglov S. P. Adaptivnoe upravlenie skalyarny`m ob`ektom v forme vxod–vy`xod na osnove identifikacionno-approksimacionnogo podxoda // *Problemy` upravleniya*. 2024. № 6. S. 38–50.
12. Mattera G., Caggiano A., Nele L. Reinforcement Learning as Data-Driven Optimization Technique for GMAW Process // *Welding in the World*. 2024. Vol. 68. P. 805–817. DOI: 10.1007/s40194-023-01641-0.
13. Sofrony J., Turner M. C., Richards C. M. Anti-Windup Compensation for Model Reference Adaptive Control Schemes // *International Journal of Robust and Nonlinear Control*. 2024. Vol. 34. No. 15. P. 10176–10193. DOI: 10.1002/rnc.7511.
14. Biber A., Sharma R. Concept for Sensor Based Self Tuning Gas Metal Arc Welding Process Control // *Discover Mechanical Engineering*. 2026. Vol. 5. Art. 73. DOI: 10.1007/s44245-026-00247-2.

15. Shahab M. T., Miller D. E. Revisiting Model Reference Adaptive Control: Linear-Like Closed-Loop Behavior // IEEE Transactions on Automatic Control. 2025. Vol. 70. No. 3. P. 1483–1498. DOI: 10.1109/TAC.2024.3462555.
16. Wu K., Yang H., Lin J., Shi Y., Zeng M., Hong X. Novel Double-Wire GMAW Arc Length Control Method Based on PID with Derivative on Measurement // Journal of Manufacturing Processes. 2025. Vol. 150. P. 827–842. DOI: 10.1016/j.jmapro.2025.06.060.

Статья поступила в редакцию 15.01.2026; одобрена после рецензирования 12.03.2026; принята к публикации 14.05.2026.

The article was submitted 15.01.2026; approved after reviewing 12.03.2026; accepted for publication 14.05.2026.