

УДК 621.791.75+681.5+004.8
DOI: 10.18799/24131830/2025/9/5150
Шифр специальности ВАК: 05.14.01
Научная статья

Математическое моделирование управления движением электродов электросталеплавильной печи на основе нечеткой логики

И.У. Рахмонов¹✉, М.Ф. Коржобова¹, В.Я. Ушаков², Ф.А. Хошимов¹

¹ Ташкентский государственный технический университет, Узбекистан, г. Ташкент

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉ilider1987@yandex.ru

Аннотация. Актуальность. Электросталеплавильные печи являются одним из самых энергоемких элементов в технологической цепи металлургических предприятий. Около 50 % от общего объема потребления электроэнергии приходится на процессы, осуществляемые в электросталеплавильной печи. Неуклонный рост спроса на стальную продукцию в мире, ограниченность энергетических ресурсов и низкая энергоэффективность действующих электросталеплавильных печей обуславливают необходимость внедрения инновационных управленческих решений в этой сфере. **Цель.** Улучшение управления движением электродов в электросталеплавильной печи, разработка интеллектуальной системы управления на основе нечеткой логики и повышение эффективности управления с её помощью с учётом непоследовательности и высокой динамичности, присущих технологическому процессу. **Методы.** Метод математического моделирования на основе модели нечеткой логики Мамдани. Выполнена фаззификация основных технологических параметров, и для них определены функции релевантности (гауссовская и треугольная). Процесс принятия решений был автоматизирован, а дефаззификация была выполнена с помощью метода центра тяжести. Кроме того, проводился визуальный анализ с использованием 3D-графиков и тепловых карт. **Результаты.** Удалось эффективно управлять скоростью перемещения электродов в электросталеплавильной печи ДСП-30 в диапазоне от -4 до +3 см/с (при этом положительные значения соответствуют движению электродов в сторону металлического расплава, а отрицательные – движению в противоположном направлении). Установлено, что при силе тока дуги более 37 кА необходимо поднимать электроды со скоростью 4 см/с. Благодаря построенной таблице решений и использованию механизма нечеткой логики стало возможным определение скорости электрода в зависимости от тока и напряжения электрической дуги. При этом параметры электрической дуги поддерживались в пределах нормы, и обеспечивалась стабильность технологического процесса. Общая технологическая эффективность возросла за счет снижения энергопотребления на 5,1 % и уменьшения поломок электродов, что доказывает практическую ценность внедрения цифровых интеллектуальных систем управления в электросталеплавильной печи.

Ключевые слова: электросталеплавильное производство, энергоэффективность, нечеткая логика, движение электродов, интеллектуальное управление, математическое моделирование, дефаззификация, длина электрической дуги

Для цитирования: Математическое моделирование управления движением электродов электросталеплавильной печи на основе нечеткой логики / И.У. Рахмонов, М.Ф. Коржобова, В.Я. Ушаков, Ф.А. Хошимов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 9. – С. 212–226. DOI: 10.18799/24131830/2025/9/5150

УДК 621.791.75+681.5+004.8
DOI: 10.18799/24131830/2025/9/5150
Scientific paper

Mathematical modeling of electrode motion control in an electric arc furnace based on fuzzy logic

I.U. Rakhmonov¹✉, M.F. Korjobova¹, V.Ya. Ushakov², F.A. Hoshimov¹

¹ Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan

² National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉ilider1987@yandex.ru

Abstract. Relevance. Electric arc furnaces are among the most energy-intensive units in the technological chain of metallurgical enterprises. Approximately 50% of the total electricity consumption is attributed to processes carried out in electric arc furnaces. The steady global increase in demand for steel products, the limited availability of energy resources, and the low energy efficiency of existing electric arc furnaces highlight the need for innovative management solutions in this field. **Aim.** Improvement of electrode movement control in an electric arc furnace, development of an intelligent control system based on fuzzy logic, and enhancement of control efficiency using this system, taking into account the inconsistency and high dynamics inherent in the technological process. **Methods.** Mathematical modeling based on the Mamdani fuzzy logic model. The main technological parameters were fuzzified, and corresponding membership functions (Gaussian and triangular) were defined. Decision-making was automated, and defuzzification was performed using the center of gravity method. Additionally, visual analysis was conducted using 3D graphs and heat maps. **Results.** The research successfully enabled effective control of the electrode movement speed in the EAF-30 within the range of -4 to $+3$ cm/s (in this case, positive values indicate electrode movement toward the molten metal, whereas negative values indicate movement in the opposite direction). It was established that when the arc current exceeds 37 kA, electrodes should be lifted at a speed of -4 cm/s. With the help of the constructed decision table and the mechanism of fuzzy logic the electrode movement speed could be determined based on arc current and voltage. As a result, arc parameters were maintained within normal ranges, ensuring process stability. Overall technological efficiency improved due to a 5,1% reduction in energy consumption and a decrease in electrode failures, demonstrating the practical value of implementing digital intelligent control systems in electric arc furnaces.

Keywords: electric steelmaking, energy efficiency, fuzzy logic, electrode movement, intelligent control, mathematical modeling, defuzzification, arc length

For citation: Rakhmonov I.U., Korjobova M.F., Ushakov V.Ya., Hoshimov F.A. Mathematical modeling of electrode movement control in electric arc furnaces based on fuzzy logic. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 9, pp. 212–226. DOI: 10.18799/24131830/2025/9/5150

Введение

Процесс выплавки стали в электропечах является одним из самых энергоёмких в металлургии, потребляя до 50 % всей электроэнергии отрасли. Мировой спрос на сталь неуклонно растёт, и к 2030 г. энергопотребление сталеплавильного производства может увеличиться на 55 % [1–3]. Удельный расход электроэнергии в развитых странах составляет в среднем 420 кВт·ч/т (0,036 т.н.э./т), тогда как на исследуемой ДСП-30 он достигает 550 кВт·ч/т (0,047 т.н.э./т), что на 31 % выше. Основная часть этой энергии (78 %, или около 430 кВт·ч) расходуется на электродуговую плавку стали, тогда как на окисление приходится 6,5 %, на рафинирование – 4,5 %, а на прокатку – 11 %. Таким образом, управление движением электродов в процессе электродуговой плавки является ключевым направлением повышения энергоэффективности.

В процессе электросталеплавления управление движением электродов является предметом ряда научных исследований. В частности, разработан метод анализа движения электродов на основе моделирования электрического режима электродуговой печи средней мощности, и обоснована возможность его применения в системе hardware-in-the-loop [4]. В ряде работ была синтезирована система управления движением электродов на основе нечеткой логики, ориентированной на учет значений фазных токов и длины электрической дуги [5, 6]. На примере печи типа ДСП-200 с использованием системы управления типа Сугено была исследована динамика системы при детерминированных возмущениях. Зафиксировано снижение потерь элек-

трической энергии на 10–22 % [7]. Также были разработаны модели, обеспечивающие автономное управление по фазам на основе адаптивных нечетких правил. В других исследованиях представлены компьютерные модели управления электродами с использованием правил нечеткой логики, демонстрирующие повышение устойчивости системы при воздействии как детерминированных, так и стохастических возмущений.

Кроме того, в этих работах реализовано управление длиной электрической дуги в каждой фазе с применением нечеткой логики, что позволило снизить дисперсию дугового тока и тем самым повысить точность управления [8]. Также была синтезирована система управления на базе Мамдани, в которой формируются управляющие сигналы для движения электродов на основе значений дугового тока и напряжения. Однако в указанной работе выходные параметры скорости движения электродов представлены не в виде конкретных численных значений, а через лингвистические зоны, такие как “severe up”, “moderate down” и др. [9].

Несмотря на достигнутые успехи, существующие научные подходы недостаточно полно рассматривают вопрос определения зависимости скорости движения электродов от взаимосвязанных параметров дугового тока, напряжения и длины дуги.

Проведённый анализ результатов практического опыта и научных исследований, представленных в литературе, позволил выявить причины такого различия, а именно основные факторы, увеличивающие расход электроэнергии при выплавке стали

[10–13]. Факторы, влияющие на потребление электроэнергии в электросталеплавильной печи (ЭСП), названы и описаны ниже:

- неупорядоченное размещение шихты;
- состав и качество шихты;
- поломка электродов;
- нарушение качества шлакообразующих материалов;
- нарушения в системе подачи газа и кислорода.

В ряде публикаций [14–17] приведены результаты обширных исследований влияния таких факторов, как размещение первичной шихты, состав и качество шихты, распыление газа в ванне печи при плавке металла и др. Однако проблемы, связанные с поломкой и повреждением электродов в процессе электросталеплавильного производства, изучены недостаточно. Соответствующими исследованиями установлено, что средняя частота поломок электродов в больших и малых печах емкостью 5–100 т (до 10–50 поломок в год) зависит от многих факторов. Это, в свою очередь, снижает интенсивность технологического процесса выплавки стали в среднем на 10–20 %. При этом удельный расход электроэнергии на тонну продукции увеличивается в среднем на 5–12 %, а удельный расход электродов – в среднем на 0,5–1,0 кг/т. В этой связи исследования по устранению поломок электродов в сталеплавильных печах имеет актуальное значение [18]. При этом сокращение частоты обрывов электродов благодаря созданию системы регулирования и управления перемещением электродов позволяет снизить удельный расход электроэнергии на единицу продукции в сталеплавильном производстве примерно на 5–7 %.

Исходя из актуальности вышеизложенного, основная цель данной статьи заключается в повышении эффективности управления движением электродов в ЭСП, разработке интеллектуальной системы управления на основе нечеткой логики, а также оптимизации процесса управления с учетом нестабильности и высокой изменчивости технологических параметров, характерных для данного процесса.

Методология и результаты

Известно, что плавка стали является многостадийным и сложным нелинейным процессом. Вследствие нелинейности технологического процесса электрические параметры дуги существенно изменяются за короткий промежуток времени. Это, в свою очередь, затрудняет оптимальное управление скоростью движения электродов, основанное на поддержании длины электрической дуги в приемлемом диапазоне. В таком сложном процессе автоматизированная система управления на ЭСП должна работать быстро и эффективно. Важными

переменными, которые существенно влияют на скорость движения электродов и длину электрической дуги, являются ток и напряжение. Необходимы специализированные экспертные операционные знания, внедрение современных и интеллектуальных технологий на основе цифровизации [19].

В настоящее время для решения задач, возникающих в процессе плавки стали в электродуговых печах, применяется множество методов. Однако многочисленные исследования показывают, что использование нечеткой логики в сталеплавильном процессе является эффективным решением, несмотря на сложность и высокую изменчивость технологических параметров [20]. В условиях изменения электрических параметров в процессе электросталеплавильного процесса для управления технологическим процессом широко применяются модели нечеткой логики Мамдани и Сугено. Основное различие заключается в том, что система Мамдани использует нечеткие множества в качестве выходных переменных, тогда как система Сугено формирует выходные значения в виде линейных или постоянных функций. В системе Мамдани дефаззификация осуществляется методом центра тяжести (центроид). Правила принятия решений формулируются по схеме IF–THEN и реализуются с использованием двух основных методов инференции: Max–Min; Max–Product.

При этом, как правило, функция принадлежности для выходной переменной формируется посредством максимального оператора (методом Max–Product). Далее, чтобы получить четкое и интерпретируемое выходное значение, применяется этап дефаззификации с использованием таких методов, как центр тяжести или усреднение по максимуму. Система Мамдани превосходит системы Сугено и Цукамото за счёт своей адаптивности к базе знаний и простоты практической реализации [21, 22]. В связи с этим для управления в рамках нечеткой логики была использована именно система Мамдани.

Кроме того, учитывая цель рассматриваемой задачи – количественную оценку энергоэффективности по показателю удельного расхода электроэнергии на 1 т продукции – была применена модель Сугено. В данной модели выходная функция задавалась в виде линейного алгебраического выражения, что, в свою очередь, обеспечило возможность получения точных количественных результатов и их энергетической оценки.

Процесс дефаззификации выполняется на основе данных табл. 1. Дефаззификация является заключительным этапом обработки, преобразующим выходной результат нечеткой системы – набор лингвистических переменных – в четкие значения, понятные инженеру. После фаззификации входных

данных и обработки по нечеткой логике Мамдани результат интерпретируется в инженерных терминах. Управление процессом движения электродов в модели Мамдани включает фазификацию входных параметров (тока, напряжения, длины дуги), применение базы правил с лингвистическими переменными, агрегирование выходных значений и дефазификацию для получения управляющего воздействия. Для этого был разработан набор лингвистических переменных для параметров дугового тока, напряжения и скорости его изменения.

Одним из ключевых её преимуществ является простота интеграции с существующими традиционными системами управления. Система управления, основанная на нечеткой логике, обладает способностью адаптироваться к изменениям тока и напряжения электрической дуги. Это, в свою очередь, позволяет поддерживать длину дуги между электродами и металлом в допустимых пределах и одновременно регулировать скорость движения электродов. Регулирование длины электрической дуги посредством методов нечеткой логики способствует снижению риска поломки электродов, повышает энергоэффективность и интенсификацию плавки.

В среднем за сутки с помощью печи ДСП-30, являющейся объектом нашего исследования, переплавляется 500–550 т металлолома. По состоянию на 2024 г. годовое потребление электроэнергии этой печью составляет в среднем 66–70 млн кВт·ч (5848 т.у.т.). Среднемесячное потребление электроэнергии составляет 5,4–5,8 млн кВт·ч (481,6 т.у.т.). В технологическом процессе значения тока и напряжения электрической дуги изменяются в достаточно широком диапазоне для ускорения плавки металла и формирования шлака. При плавке твердого металлолома в электрической дуге ток дуги имеет резкопеременный характер и изменяется в среднем в пределах от 17 до 37 кА за короткий промежуток времени. Вертикальное движение электродов для регулировки электрического тока осуществляется быстро. Это, в свою очередь, затрудняет удержание тока и напряжения дуги в допустимых пределах. Процесс плавки стали занимает в среднем 35–45 минут; при подготовке стали и проката расходуется 60–80 % всей электроэнергии.

В результате проведенного анализа установлена необходимость организации управления на основе нечеткой логики, которая позволяет учитывать скорость движения электродов в ЭСП даже при незначительных изменениях параметров электрической дуги. При математическом моделировании управления скоростью движения электродов в печах типа ДСП-30 в системе нечеткого управления в первую очередь необходимо классифицировать входные параметры в виде нечетких лингвистиче-

ских множеств. Разработан набор лингвистических переменных для входных параметров тока электрической дуги, напряжения электрической дуги и скорости изменения длины дуги.

Значение тока, протекающего через электрическую дугу при управлении перемещением электродов в ЭСП, начинается в среднем с 15 кА. Однако минимальное значение тока было принято равным 17 кА, поскольку оно является пороговым, с которого начинается влияние на режим плавки. Для этих значений тока были приняты нечеткие логические переменные:

- $ThL=\{I\in[15;17;20\text{ кА}]\}$ – очень низкий; $I_{\max}=17\text{ кА}$;
- $L=\{I\in[21;23;25\text{ кА}]\}$ – низкий; $I_{\max}=23\text{ кА}$;
- $M=\{I\in[26;27;29\text{ кА}]\}$ – средний; $I_{\max}=27\text{ кА}$;
- $H=\{I\in[30;33;35\text{ кА}]\}$ – высокий; $I_{\max}=33\text{ кА}$;
- $ThH=\{I\in[36;37;38\text{ кА}]\}$ – очень высокий; $I_{\max}=37\text{ кА}$.

Изменения напряжения на электрической дуге:

- $Boun=\{U\in[-6\%;-4\%]\}$ – очень низкое; $U_{\max}=375\text{ В}$;
- $Min=\{U\in[-4\%;-2,5\%]\}$ – низкое; $U_{\max}=384\text{ В}$;
- $Med=\{U\in[-2,5\%;-1,5\%;2,5\%]\}$ – среднее; $U_{\max}=390\text{ В}$;
- $Max=\{U\in[-2,5\%;4\%;6\%]\}$ – высокое; $U_{\max}=416\text{ В}$;
- $FM=\{U\in[6\%;8\%]\}$ – высокое; $U_{\max}=425\text{ В}$.

Изменения длины электрической дуги:

- $ThLarc=\{l\in[2;5\text{ см}]\}$ – близкая (но необходимо увеличить); $l_{\max}=5\text{ см}$;
- $Larc=\{l\in[6;10\text{ см}]\}$ – ближе к требуемой (но длину необходимо увеличить); $l_{\max}=11\text{ см}$;
- $Marc=\{l\in[12;24\text{ см}]\}$ – нормальная; $l_{\max}=25\text{ см}$;
- $Harc=\{l\in[26;35\text{ см}]\}$ – требует увеличения; $l_{\max}=35\text{ см}$;
- $Tharc=\{l\in[36<l\text{ см}]\}$ – излишне длинная; $l_{\max}=50\text{ см}$.

Если значения тока через дугу, напряжения на дуге и ее длины попадают в один диапазон, то, в соответствии со значениями переменных нечеткой логики, используются следующие управляющие воздействия.

Для тока через электрическую дугу:

- а) очень низкий $15\text{ кА} \leq I < 19\text{ кА}$, $I < 16\text{ кА}$ обозначается термином очень низкий (О);
- б) в диапазоне $17\text{ кА} \leq I < 27\text{ кА}$ приблизительное значение определяется термином «близко» (Б);
- в) «за пределами» (З) в случаях $I > 37\text{ кА}$.

Для напряжения на электрической дуге:

- а) очень низкое значение определяется термином (О), если $360\text{ В} \leq U < 380\text{ В}$;
- б) в диапазоне $384\text{ В} \leq U < 395\text{ В}$ значение определяется термином «близко» (Б);
- в) при значениях $U > 425\text{ В}$ используется термин «за пределами» (З).

Для длины электрической дуги:

- а) очень короткая обозначается термином (О), если $2\text{ см} \leq l < 7\text{ см}$;
- б) для интервалов $12 \leq l < 24\text{ см}$ используется термин «близко» (Б);
- в) для значений $l > 45\text{ см}$ используется термин «вне границы» (В).

В ЭСП в качестве резко изменяющихся параметров выступают расчетные значения тока и напряжения электрической дуги. Различия этих параметров выражаются функциями принадлежности. Учитывая особенности функций принадлежности, наилучшей с научной точки зрения считается применение гауссовской функции принадлежности для представления физических процессов с нечеткими, экспоненциально изменяющимися входными параметрами. По этой причине для представления тока и напряжения электрической дуги была выбрана гауссовская функция принадлежности. Ниже приведены математические выражения гауссовских функций принадлежности, соответствующие критическим значениям тока и напряжения электрической дуги, а также рассчитанные на их основе численные значения. Использование функции принадлежности Гаусса позволило точно отразить изменения тока и напряжения электрической дуги, обладающих нелинейным характером, как в узком, так и в широком диапазонах в условиях нечеткой логики. Это, в свою очередь, обеспечило возможность точного регулирования скорости и направления движения электродов при выходном параметре – длине электрической дуги – в пределах оптимальных границ.

В технологическом процессе значение тока электрической дуги оказывает существенное влияние на стабильность горения дуги, энергетическую эффективность и качество получаемого металла. Для более точного управления процессом применяется метод нечеткой логики, позволяющий учитывать плавные переходы между различными режимами тока. Ниже приведены функции принадлежности, отражающие степень принадлежности текущих значений тока соответствующим лингвистическим переменным.

Гауссовская функция принадлежности широко применяется при моделировании нелинейных и сложных технологических систем, а также нечетких процессов. Особенно эффективно её использование в случаях, когда входные параметры характеризуются неопределённостью и обладают естественной экспоненциальной природой изменения. В связи с этим в настоящем исследовании гауссовская функция принадлежности выбрана для точного описания тока и напряжения электрической дуги.

Очень низкий ток (ОНТ):

Критическое значение тока $I = 17$ кА.

Функция принадлежности:

$$\mu_{\overline{\text{ОНТ}}}(x) = \begin{cases} x \in (-\infty; 17) \rightarrow 1 \\ x \in [17; 23] \rightarrow e^{-\frac{2(x-17)^2}{9}} \end{cases}, \quad (1)$$

Низкий ток (НТ):

Критическое значение тока $I = 23$ кА.

Функция принадлежности:

$$\mu_{\overline{\text{НТ}}}(x) = \begin{cases} x \in [17; 23] \rightarrow e^{-\frac{2(x-23)^2}{9}} \\ x \in [23; 25] \rightarrow e^{-2(x-23)^2} \end{cases}, \quad (2)$$

Немного слабый ток (НСТ):

Критическое значение тока $I = 25$ кА.

Функция принадлежности:

$$\mu_{\overline{\text{НСТ}}}(x) = \{x \in [23; 27] \rightarrow e^{-2(x-25)^2}\}, \quad (3)$$

Средний ток (СТ):

Критическое значение тока $I = 27$ кА.

Функция принадлежности:

$$\mu_{\overline{\text{СТ}}}(x) = \{x \in [23; 27] \rightarrow e^{-2(x-25)^2}\}, \quad (4)$$

Нормальный ток (НрТ):

Критическое значение тока $I = 29$ кА.

Функция принадлежности:

$$\mu_{\overline{\text{НрТ}}}(x) = \{x \in [27; 31] \rightarrow e^{-2(x-29)^2}\}, \quad (5)$$

Немного более высокий ток (НБВТ):

Критическое значение тока $I = 31$ кА.

Функция принадлежности:

$$\mu_{\overline{\text{НБВТ}}}(x) = \begin{cases} x \in [29; 31] \rightarrow e^{-2(x-31)^2} \\ x \in [31; 34] \rightarrow e^{-\frac{8(x-31)^2}{9}} \end{cases}, \quad (6)$$

Высокий ток (ВТ):

Критическое значение тока $I = 34$ кА.

Функция принадлежности:

$$\mu_{\overline{\text{ВТ}}}(x) = \{x \in [31; 37] \rightarrow e^{-\frac{8(x-34)^2}{9}}\}, \quad (7)$$

Очень высокий ток (ОВТ):

Критическое значение тока $I = 37$ кА.

Функция принадлежности:

$$\mu_{\overline{\text{ОВТ}}}(x) = \begin{cases} x \in [34; 37] \rightarrow e^{-\frac{8(x-37)^2}{9}} \\ x \in (37; \infty) \rightarrow 1 \end{cases}. \quad (8)$$

В процессе электросталеплавления изменения тока дуги (I) позволяют определить стадии технологического процесса с помощью функций принадлежности. При $I = 17$ кА формируется электрическая дуга, что соответствует максимальной принадлежности и обозначается как «очень низкий ток» (ОНТ) (1). Быстрое увеличение тока до 23 кА отражает расширение дуги и активизацию процесса плавления – стадия «низкий ток» (НТ) (2). Далее при 25 кА происходит нагрев шихты до состояния устойчивого плавления (3). При 27 кА достигается максимальный тепловой эффект между электродами и металлом (4), а около 29 кА ток стабилизируется, что свидетельствует о контролируемой длине дуги (5). В этот момент шихта, как правило, полностью расплавлена, однако из-за удержания длины дуги возможно дальнейшее повышение тока (6). Значения тока от 30 кА и выше считаются опасны-

ми, поскольку ведут к повреждению электродов и перерасходу энергии (7), (8).

С помощью вышеприведенных выражений была построена гауссовская функция принадлежности для всех определенных критических точек электродового тока, и соответствующие значения были визуально выделены различными цветами (рис. 1).

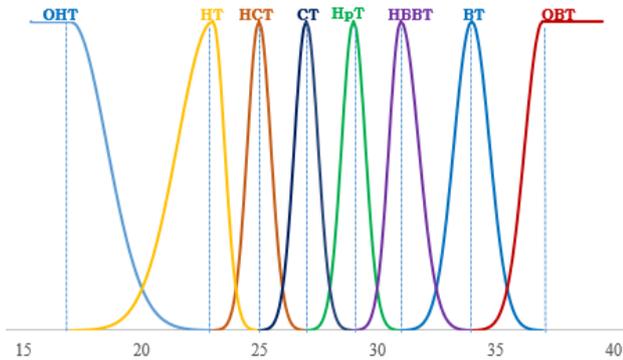


Рис. 1. Функция принадлежности нечеткой логики для тока электрической дуги, влияющего на процесс электросталеплавления

Fig. 1. Fuzzy logic membership function for arc current affecting the electric steelmaking

Изменение напряжения электрической дуги в технологическом процессе оказывает прямое воздействие на стабильность дугового разряда, тепловой режим печи и на эффективность использования энергии. Для анализа и управления данным параметром используется подход нечеткой логики, позволяющий учитывать переходные состояния между различными уровнями напряжения. Ниже представлены функции принадлежности для лингвистических переменных, характеризующих степень отклонения напряжения от нормативного значения (в процентах). Для обеспечения универсальности управления процессом плавки в ЭСП при различной мощности описаны критические значения в процентах от напряжения на электрической дуге и разработаны соответствующие функции принадлежности (рис. 2). Здесь при отрицательных значениях напряжения определяется приближение электродов к металлу, в результате чего определяется скорость подъема и расстояние перемещения электродов. При положительных значениях напряжения и, соответственно, увеличенной длине дуги определяется скорость опускания электродов.

Очень низкое напряжение (ОНН):

Критическое значение: $U = -6\%$.

Функция принадлежности:

$$\mu_{\overline{ОНН}}(x) = \begin{cases} x \in (-\infty; -6) \rightarrow 1 \\ x \in [-6; -4] \rightarrow e^{-2(x+6)^2} \end{cases}, \quad (9)$$

Низкое напряжение (НН):

Критическое значение: $U = -4\%$.

Функция принадлежности:

$$\mu_{\overline{НН}}(x) = \begin{cases} x \in [-6; -4] \rightarrow e^{-2(x+4)^2} \\ x \in (-4; -2,5] \rightarrow e^{-\frac{9(x+4)^2}{2}} \end{cases}, \quad (10)$$

Немного ниже нормального напряжения (ННрН):

Критическое значение: $U = -2,5\%$.

Функция принадлежности:

$$\mu_{\overline{ННрН}}(x) = \begin{cases} x \in [-4; -2,5] \rightarrow e^{-\frac{32(x+2,5)^2}{9}} \\ x \in (-2,5; -1,5] \rightarrow e^{-8(x+2,5)^2} \end{cases}, \quad (11)$$

Среднее напряжение (СН):

Критическое значение: $U = -1,5\%$.

Функция принадлежности:

$$\mu_{\overline{СН}}(x) = \begin{cases} x \in [-2,5; -1,5] \rightarrow e^{-8(x+1,5)^2} \\ x \in (-1,5; 1,5] \rightarrow e^{-\frac{8(x+1,5)^2}{9}} \end{cases}, \quad (12)$$

Нормальное напряжение (НрН):

Критическое значение: $U = 1,5\%$.

Функция принадлежности:

$$\mu_{\overline{НрН}}(x) = \begin{cases} x \in [-1,5; 1,5] \rightarrow e^{-\frac{8(x-1,5)^2}{9}} \\ x \in (1,5; 2,5] \rightarrow e^{-8(x-1,5)^2} \end{cases}, \quad (13)$$

Немного выше нормального напряжения (НВрН):

Критическое значение: $U = 2,5\%$.

Функция принадлежности:

$$\mu_{\overline{НВрН}}(x) = \begin{cases} x \in [1,5; 2,5] \rightarrow e^{-8(x-2,5)^2} \\ x \in (2,5; 4] \rightarrow e^{-\frac{32(x-2,5)^2}{9}} \end{cases}, \quad (14)$$

Высокое напряжение (ВН):

Критическое значение: $U = 4\%$.

Функция принадлежности:

$$\mu_{\overline{ВН}}(x) = \begin{cases} x \in [2,5; 4] \rightarrow e^{-\frac{32(x-4)^2}{9}} \\ x \in (4; 6] \rightarrow e^{-2(x-4)^2} \end{cases}, \quad (15)$$

Очень высокое напряжение (ОВН):

Критическое значение: $U = 6\%$.

Функция принадлежности:

$$\mu_{\overline{ОВН}}(x) = \begin{cases} x \in [4; 6] \rightarrow e^{-2(x-6)^2} \\ x \in (6; \infty) \rightarrow 1 \end{cases}. \quad (16)$$

В зависимости от изменения напряжения дуги функции принадлежности были классифицированы по восьми лингвистическим категориям. При напряжении $U = -6\%$ фиксируется состояние «очень низкое напряжение» (ОНН) с максимальной принадлежностью, равной 1 (9).

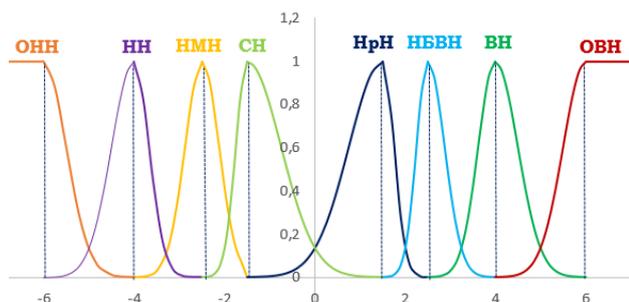


Рис. 2. Функция принадлежности нечеткой логики для напряжения электрической дуги
Fig. 2. Fuzzy logic membership function for arc voltage

При $U = -4\%$ наблюдается «низкое напряжение» (НН) с резко убывающей экспоненциальной функцией (10). Приблизительно $-2,5\%$ соответствует состоянию «немного ниже нормального напряжения» (НННрН) (11), $-1,5\%$ – «среднее напряжение» (СН) (12). При $1,5\%$ достигается «нормальное напряжение» (НрН), что соответствует устойчивому режиму дуги (13). Далее при $U = 2,5\%$ наблюдается «немного выше нормального напряжения» (НВНрН) (14), при 4% – «высокое напряжение» (ВН) (15), а при превышении 6% – «очень высокое напряжение» (ОВН) (16). Эта функция принадлежности представлена на рис. 2, где каждая категория построена в форме гауссовской кривой и используется как входная переменная в нечеткой системе управления дуговым напряжением.

При необходимости, например, с целью создания мелкозернистой системы управления, в соответствии со значениями нечеткой функции принадлежности можно управлять скоростью движения электродов, поддерживая при этом длину электрической дуги в приемлемых пределах. Однако на практике этот прием практически не применяется. Для описания связи длины дуги (l) с координатами начального положения электродов, которые всегда должны находиться в нормальном положении (x_0), со временем и со скоростью движения электродов ($v_{эл}$) использовалась следующая формула:

$$l = x_0 + v_{эл}t. \quad (17)$$

С помощью формулы (17) определяется положение электродов на определенном расстоянии от их начальной координаты, а также появляется возможность расчёта скорости движения электродов на основе длины электрической дуги l . Данный подход позволяет математически оценить точное положение электродов и динамику их движения.

На рис. 3 представлена структурная блок-схема устройства управления на основе нечеткой логики, основанная на разнице значений тока электрической дуги, напряжения и длины электрической дуги в ЭСП.

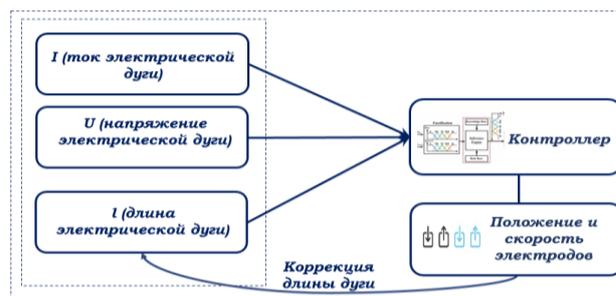


Рис. 3. Управление скоростью движения электрода на основе механизма принятия решений с нечеткой логикой
Fig. 3. Control of electrode movement speed based on the fuzzy logic decision-making mechanism

Fig. 3. Control of electrode movement speed based on the fuzzy logic decision-making mechanism

Анализ результатов управления скоростью движения электродов в печи ДСП-30 выполнен с использованием механизма нечеткой логики второго типа, в котором применяется метод дефаззификации типа «центр тяжести». Как показано на рис. 4, регулирование скорости движения электродов ($v_{эл}$) на различных уровнях позволяет реализовать линейное управление длиной электрической дуги. Следовательно, значение $v_{эл}$ может быть как положительным, так и отрицательным. В зависимости от интервала, оно может быть положительным при низкой, средней и высокой скорости, а также отрицательным при низкой, средней и высокой скорости. На основе таблицы решений (табл. 1), приведённой ниже, положительные значения $v_{эл}$ обеспечивают приближение электродов к металлическому расплаву, а отрицательные значения способствуют удалению электродов от металла.

Система нечеткого управления по Мамдани включает фуззификацию входных переменных – значение тока дуги $I_{дуга}$ и напряжения $U_{дуга}$, которые фаззифицируются с использованием соответствующих функций принадлежности. На выходе формируются управляющие воздействия. После обработки данных по базе правил и проведения дефаззификации определяются выходные параметры – длина дуги ($l_{дуга}$) и скорость перемещения электрода ($v_{элек}$). Такой подход обеспечивает автоматический контроль скорости и направления движения электрода в зависимости от изменений тока и напряжения электрической дуги. В модели Мамдани использованы треугольные функции принадлежности для скорости движения электрода и импульсные – для пределов изменения длины дуги. В табл. 1 и на рис. 7 показаны изменения скорости движения электрода в качестве выходного значения.

Как было отмечено выше, скорость движения электродов в ЭСП является важным параметром, определяющим стабильность дуги, эффективность плавления и уровень энергопотребления.

Таблица 1. Таблица решений для определения скорости движения электродов при различных значениях тока и напряжения электрической дуги

Table 1. Decision table for determining electrode movement speed under various arc current and voltage conditions

I, кА \ U, %	U, %							
	$U_{ОНН} \leq -6$	$U_{НН} \leq -4$	$U_{НМН} \leq -2,5$	$U_{СН} \geq -1,5$	$U_{НН} \geq 1,5$	$U_{НВН} \geq 2,5$	$U_{ВН} \geq 4$	$U_{ОВН} > 6$
$I_{ОНТ} \leq 17$	Очень быстрое опускание Very fast lowering		Быстрое опускание Fast lowering		Медленное опускание Slow lowering	Быстрый подъем Fast raising	Быстрое опускание Fast lowering	Очень быстрое опускание Very fast lowering
$I_{НТ} \leq 23$	Быстрое опускание Fast lowering		Медленный подъем Slow raising	Медленное опускание Slow lowering	Нормальное положение Normal position	Медленное опускание Slow lowering		
$I_{НСТ} \leq 25$	Медленное опускание Slow lowering		Медленный подъем Slow raising	Нормальное положение Normal position	Медленный подъем Slow raising	Медленное опускание Slow lowering		
$I_{СТ} \geq 27$	Медленное опускание Slow lowering		Медленный подъем Slow raising		Быстрый подъем Fast raising	Медленный подъем Slow raising		
$I_{НТ} \geq 31$	Медленный подъем Slow raising				Быстрый подъем Fast raising	Медленный подъем Slow raising	Быстрый подъем Fast raising	
$I_{НВВТ} \geq 34$	Быстрый подъем Fast raising		Медленный подъем Slow raising		Быстрый подъем Fast raising	Быстрое опускание Fast lowering		Очень быстрый подъем Very fast raising
$I_{ВТ} \geq 37$	Очень быстрый подъем Very fast raising		Быстрый подъем Fast raising			Очень быстрый подъем Very fast raising		
$I_{ОВТ} > 37$	Очень быстрый подъем/Very fast raising							

В зависимости от конкретных условий процесса и характера изменения дуги скорость электродов может изменяться в широком диапазоне, что делает её важной управляемой переменной. Для её описания в рамках метода нечеткой логики применяются треугольные функции принадлежности, позволяющие плавно классифицировать скорости на лингвистические категории. Ниже представлены соответствующие функции принадлежности, отражающие различные уровни скорости вертикального перемещения электродов. Например, состояние $v_{эл} = -3$ см/с обозначается как «очень быстро вверх» (ОБВ) (18), -2 см/с – «быстрее вверх» (БВ) (19), $-1,5$ см/с – «наиболее быстро вверх» (НБВ) (20), -1 см/с – «медленно вверх» (МВ) (21), $-0,5$ см/с – «очень медленно вверх» (ОМВ) (22). В положительных скоростях, соответственно: $0,5$ см/с – «очень медленно вниз» (ОМВн) (23), 1 см/с – «медленно вниз» (МВн) (24), $1,5$ см/с – «наиболее быстро вниз» (НБВн) (25), 2 см/с – «быстрее вниз» (БВн) (26), 3 см/с – «очень быстро вниз» (ОБВн) (27). Указанные степени принадлежности представлены на рис. 4 и позволяют обеспечить корректное управление на всех этапах процесса за счёт лингвистической интерпретации каждой скорости.

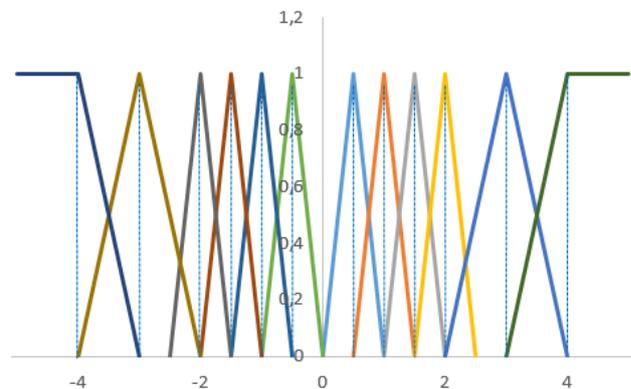


Рис. 4. График функции изменения скорости движения электродов

Fig. 4. Graph of the function describing the change in electrode movement speed

Очень быстро вверх (ОБВ):

$v_{эл} = -3$ см/с.

Точки треугольной функции: $(-2; -3; -4)$.

Функция принадлежности:

$$\mu_{v_{\text{ОБВ}}}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq -2 \text{ или } x \geq -4 \\ (-x - 2), & x \in [-2; -3] \\ (4 + x), & x \in [-3; -4] \end{cases} \quad (18)$$

Быстрее вверх (БВ):

$v_{эл} = -2$ см/с.

Точки треугольника: $(-1,5; -2; -2,5)$.

Функция принадлежности:

$$\mu_{v_{\overline{БВ}}}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq -1,5 \text{ } x \geq -2,5 \\ -2(x + 1,5), & x \in [-1; -1,5] \\ -2(-2,5 - x), & x \in [-1,5; -2] \end{cases} \quad (19)$$

Наиболее быстро вверх (НБВ):

$v_{эл} = -1,5$ см/с.

Точки треугольника: $(-1; -1,5; -2)$.

Функция принадлежности:

$$\mu_{v_{\overline{НБВ}}}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq -1 \text{ } x \geq -2 \\ -2(x + 1), & x \in [-1; -1,5] \\ -2(-2 - x), & x \in [-1,5; -2] \end{cases} \quad (20)$$

Медленно вверх (МВ):

$v_{эл} = -1$ см/с.

Точки треугольника: $(-0,5; -1; -1,5)$.

Функция принадлежности:

$$\mu_{v_{\overline{МВ}}}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq -0,5 \text{ } x \geq -1,5 \\ -2(x + 0,5), & x \in [-0,5; -1] \\ -2(-1,5 - x), & x \in [-1,5; -1] \end{cases} \quad (21)$$

Очень медленно вверх (ОМВ):

$v_{эл} = -0,5$ см/с.

Точки треугольника: $(0; -0,5; -1)$.

Функция принадлежности:

$$\mu_{v_{\overline{ОМВ}}}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \text{ } x \geq -1 \\ 2(x - 0), & x \in [0; -0,5] \\ -2(-1 - x), & x \in [-0,5; -1] \end{cases} \quad (22)$$

Очень медленно вниз (ОМВн):

$v_{эл} = -0,5$ см/с.

Точки треугольника: $(0; -0,5; -1)$.

Функция принадлежности:

$$\mu_{v_{\overline{ОМВн}}}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0,5 \text{ } x \geq 1,5 \\ 2(x - 0,5), & x \in [0,5; 1] \\ 2(1,5 - x), & x \in [1, 1,5] \end{cases} \quad (23)$$

Медленно вниз (МВн):

$v_{эл} = 1$ см/с.

Точки треугольника: $(0,5; 1; 1,5)$.

Функция принадлежности:

$$\mu_{v_{\overline{МВн}}}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0,5 \text{ } x \geq 1,5 \\ 2(x - 0,5), & x \in [0,5; 1] \\ 2(1,5 - x), & x \in [1, 1,5] \end{cases} \quad (24)$$

Наиболее быстро вниз (НБВн):

$v_{эл} = 1,5$ см/с.

Точки треугольника: $(1; 1,5; 2)$.

Функция принадлежности:

$$\mu_{v_{\overline{НБВн}}}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 1 \text{ } x \geq 2 \\ 2(x - 1), & x \in [1; 1,5] \\ 2(2 - x), & x \in [1,5; 2] \end{cases} \quad (25)$$

Быстрее вниз (БВн):

$v_{эл} = 2$ см/с.

Точки треугольника: $(1; 1,5; 2)$.

Функция принадлежности:

$$\mu_{v_{\overline{БВн}}}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 1,5 \text{ } x \geq 2,5 \\ 2(x - 1,5), & x \in [1,5; 2] \\ 2(2,5 - x), & x \in [2; 2,5] \end{cases} \quad (26)$$

Очень быстро вниз (ОБВн):

$v_{эл} = 3$ см/с.

Точки треугольника: $(1; 1,5; 2)$.

Функция принадлежности:

$$\mu_{v_{\overline{ОБВн}}}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 2, \text{ } x \geq 4 \\ x - 2, & x \in [2; 3] \\ 4 - x, & x \in [3; 4] \end{cases} \quad (27)$$

На основе приведенных выше математических выражений скорости движения электродов и данных, приведенных на рис. 4, в ДСП-30 знак и значение скорости движения электродов $v_{эл}$ определяют направление их движения относительно металла. При положительном значении $v_{эл}$ электроды приближаются к металлу (движутся вниз), а при отрицательном поднимаются вверх. Это играет важную роль в регулировании направления движения электродов вверх и вниз в зависимости от текущих технологических условий. На основе заранее определённых критических входных значений тока и напряжения электрической дуги при помощи нечеткой логики были вычислены соответствующие значения скорости движения электродов, отражённые в обобщённой табл. 1. Далее итоговые выходные значения были приведены к точным числовым значениям посредством процедуры дефаззификации. В рамках установленных оптимальных пределов длины электрической дуги построенный график характеризует зависимость между изменением тока электрической дуги и длиной дуги. Моделирование параметров дуги позволяет поддерживать её длину в оптимальных границах и обеспечивает эффективное управление процессом на начальной нестабильной стадии плавки в ЭСП. На рис. 5 визуализируется связь между изменением тока электрической дуги и её длиной.

На рис. 5 видно, что при увеличении тока электрической дуги длина дуги уменьшается. Такая зависимость позволяет в определённых пределах оптимизировать интенсивность технологического процесса и снизить нелинейность, присущую традиционному процессу электроплавки стали. На основе приведённой выше нечеткой логики в процессе электроплавки стали была выполнена математическая модель зависимости тока и длины электрической дуги, и на основании данных табл. 1 получен итоговый результат (рис. 6).

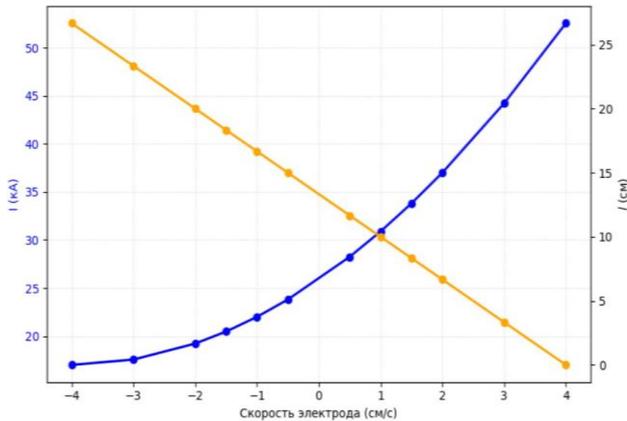


Fig. 5. Graph of the dependence of arc current and arc length on electrode movement speed

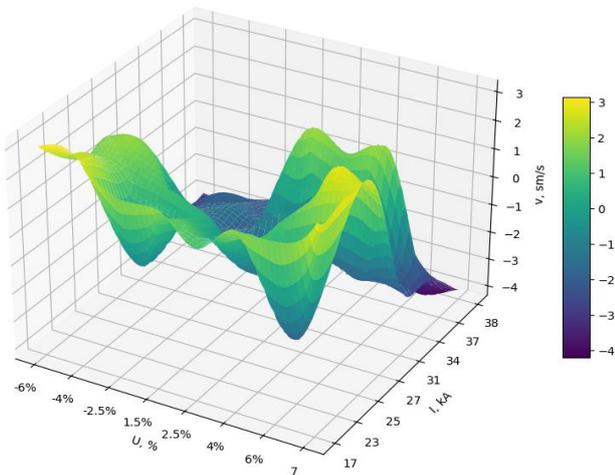


Fig. 6. 3D diagram of fuzzy logic decision-making (variation in electrode movement speed depending on arc current and voltage)

3D-диаграмма, представленная на рис. 6, отображает изменение скорости движения электрода $v_{эл}$ в зависимости от процентного изменения тока через дугу и напряжения на ней, на основе системы нечеткой логики Мамдани. Фактические (не расчетные) данные по ДСП-30 показывают, что ток изменяется в пределах от 17 до 38 кА, а отклонение напряжения на дуге составляет от -6 до $+7$ % от номинального значения. Более светлый зеленый цвет на рис. 6 означает, что ток и напряжение дуги ниже, а значит, электроды движутся вниз быстрее. Такая ситуация наблюдается, когда начинается плавление первичной шихты и параметры электрической дуги находятся на низком уровне. После

образования дуги электроды должны переместиться вверх в результате кратковременного увеличения тока дуги. Темно-фиолетовый цвет на рис. 6 указывает на большую силу тока через дугу и на необходимость быстро увеличить скорость движения электродов вверх. В частности, при значении тока электрической дуги более 37 кА такая ситуация считается опасной для печи и требует немедленного подъема электродов со скоростью $v_{эл} = -4$ см/с в пределах допустимой длины дуги. Кроме того, светлозеленая область указывает на то, что параметры электрической дуги находятся в норме и электроды, соответственно, движутся очень медленно.

Представленный метод снижения расхода электрической энергии на 1 т продукции в процессе электроплавки стали обоснован расчетами с использованием экспериментальных данных. Необходимость перемещения электродов с определенной скоростью при резком изменении дугового тока и напряжения напрямую связана с обеспечением эффективного управления процессом электроплавки стали и снижением энергозатрат. На основе проведенных исследований была разработана методика и алгоритм оценки энергетической эффективности. При этом расход электроэнергии определяется следующим выражением:

$$W = f(x_1, x_2, x_3), \quad (28)$$

где $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ – факторы, влияющие на расход электроэнергии.

Формула (28) представляет собой обобщенную математическую модель, связывающую расход электрической энергии W с совокупностью факторов x_1, x_2, x_3 отражающих технологические и эксплуатационные особенности электродуговой печи. Диапазоны оценочных значений и соответствующая классификация факторов приведены в табл. 2. На основе указанных факторов разрабатывается методика расчета энергетической эффективности с использованием модели нечеткой логики Сугено.

На основе диапазонов оценки, приведенных в табл. 2, были сформированы правила нечеткой логики с использованием модели Сугено, и для каждого правила были рассчитаны степени принадлежности. Для каждого правила степени принадлежности и выходная функция рассчитывались по методу взвешенного среднего:

$$w_i = \mu_{x_1} \cdot \mu_{x_2} \cdot \mu_{x_3}, \quad (29)$$

$$z_i = b_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3, \quad (30)$$

где $a_1 > 0, a_2 < 0, a_3 > 0$.

Комбинации входных переменных, сформированных на основе нечеткой логики, представлены в виде линейных моделей расчета удельного расхода электроэнергии (29, 30).

Таблица 2. Факторы, влияющие на расход энергии при электроплавке стали

Table 2. Factors affecting energy consumption in electric steelmaking

Код фактора Factor code	Наименование Description	Диапазон Range	Классификация Classification
x_1	Точность скорости и направления движения электродов Accuracy of electrode movement speed and direction	0–10 баллов/points	[Низкая, Средняя, Высокая] [Low, Medium, High]
x_2	Вероятность поломки электродов Probability of electrode breakage	0–1	[Высокая, Средняя, Низкая] [High, Medium, Low]
x_3	Резкая изменчивость дугового тока Sharp variability of arc current	0–100 %	[Линейно-средняя, Резкая] [Linearly moderate, Sharp]

В качестве входных переменных использованы технологические параметры x_1 , x_2 , x_3 (точность скорости и направления движения электродов, вероятность поломки электродов и степень колебаний (нестабильности) дугового тока), которые заданы в качественной форме: высокий, средний, низкий и линейный. Соответствующие комбинации входных переменных и их линейные модели приведены на рис. 7.

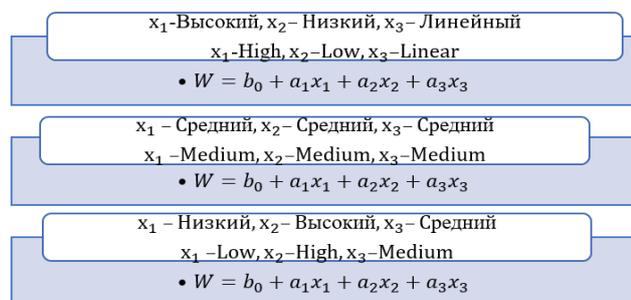


Рис. 7. Комбинации входных переменных и соответствующие линейные модели расчёта удельного расхода электроэнергии

Fig. 7. Combinations of input variables and corresponding linear models for calculating the specific electrical power consumption

Результаты экспериментальных измерений показали, что за счёт регулирования движения электродов нечеткая система управления позволила достичь следующих результатов (за счёт регулирования движения электродов, уменьшения их поломок и стабилизации дугового тока):

- x_1 → точность движения электродов увеличена на 45 %;
- x_2 → вероятность поломки электродов снижена на 30 %;
- x_3 → стабильность дугового тока повышена на 25 %.

Итоговое значение расхода электроэнергии по данной модели рассчитывалось по следующей формуле:

$$W_{\text{нов}} = \frac{\sum w_i + z_i}{\sum w_i} \rightarrow$$

$$\rightarrow d_{\text{нов}} = \frac{W_{\text{нов}}}{M} = \frac{12240}{30} = 408 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т.} \quad (31)$$

По данной модели итоговое значение расхода электрической энергии было определено по формуле (31). Из полученного значения следует, что в результате улучшения факторов, влияющих на показатель удельного расхода электрической энергии на единицу продукции, данный показатель был снижен до $d = 408 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}$.

Разработана методика оценки удельного расхода электроэнергии в процессе электроплавки стали, основанная на модели нечеткой логики Сугено, и предложен соответствующий алгоритм (рис. 8).

На основе разработанной выше модели нечеткой логики Сугено с использованием предложенной методики и алгоритма (рис. 8) была определена величина расхода электроэнергии. По результатам исследования удельный расход электроэнергии на производство 1 т стали был снижен с $d = 430 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}$ до $d = 408 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}$, что обеспечило экономию $\Delta d = 22 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}$. Данный показатель в процентном выражении представлен следующим образом:

$$\Delta d = \frac{d_{\text{до}} - d_{\text{после}}}{d_{\text{до}}} \cdot 100\% = \frac{430 - 408}{430} \cdot 100\% = 5,1 \%. \quad (32)$$

Как видно из выражения (32), за счёт системы управления, реализованной на основе нечеткой логики Мамдани, удалось достичь экономии электроэнергии в размере 5,1 %. Это, в свою очередь, при выплавке 30 т стали позволяет сэкономить в среднем 660 кВт·ч электроэнергии при разнице $\Delta d = 22 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}$.

В отличие от существующих методов, разработанная система управления движением электродов в процессе электроплавки стали на основе нечеткой логики учитывает значения дугового тока и напряжения, а также допустимые границы оптимальной длины дуги. В созданной модели была сформирована база правил с использованием системы управления Мамдани, а численные параметры выбраны на основе экспериментальных данных. Кроме того, на основе модели нечеткой логики Сугено разработана методика и алгоритм оценки энергетической эффективности. Скорость движения электродов была количественно оценена в виде чётких значений (от ± 1 до $\pm 3 \text{ см/с}$), при этом управление обеспечивало стабильный контроль дугового тока с диапазоном колебаний не более 2–3 кА.

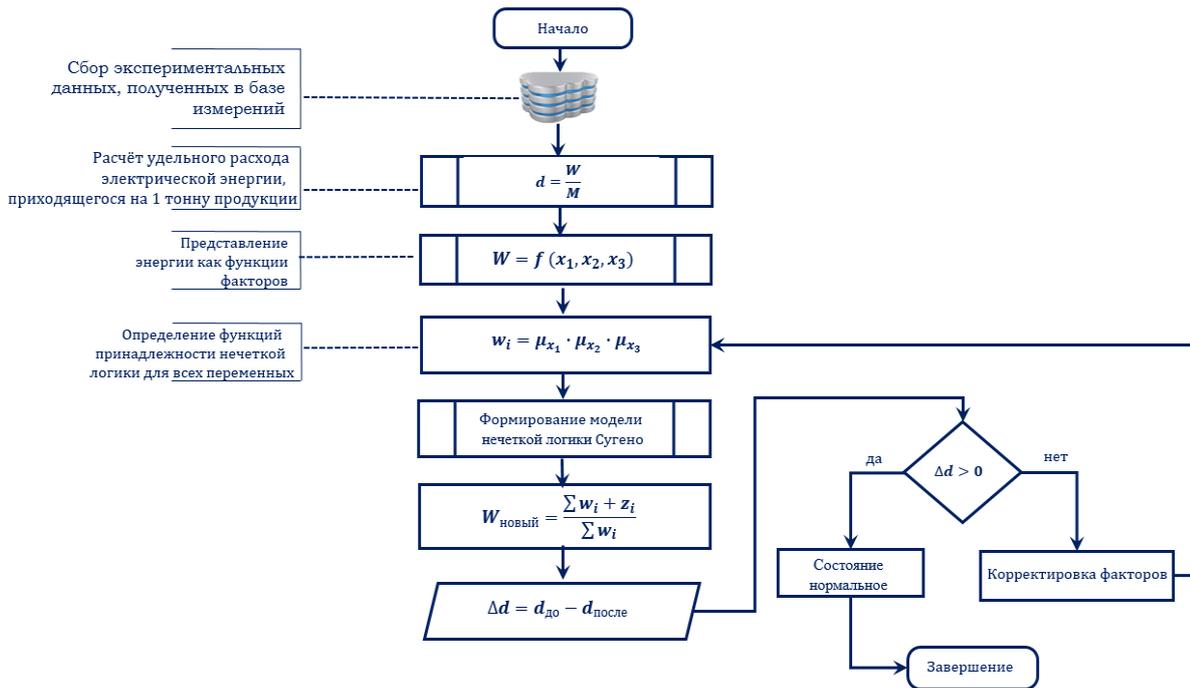


Рис. 8. Алгоритм оценки энергетической эффективности по расходу электроэнергии на 1 т продукции на основе модели нечеткой логики Сугено

Fig. 8. Algorithm for assessing energy efficiency based on electricity consumption per a ton of product based on the Sugeno fuzzy logic model

Предложенные алгоритмы управления на основе нечеткой модели были реализованы на базе контроллера Siemens S7-1500 PLC и смоделированы в среде TIA Portal, что позволило разработать практические рекомендации по повышению энергетической эффективности, увеличению срока службы электродов и внедрению оптимального управления.

Заключение

Результаты исследования показали, что удельный расход электроэнергии печью ДСП-30 на 47 % выше, чем сталеплавильными печами, применяемыми в настоящее время высокоразвитыми странами. Обоснована эффективность использования системы управления процессом плавки стали на основе нечеткой логики в условиях быстрого изменения параметров электрической дуги. Достигнутые результаты можно обобщенно представить следующим образом:

создана возможность линейного регулирования длины электрической дуги в диапазоне от 5 до 40 см при токе в дуге от 17 до 37 кА в целях обеспечения эффективной работы печи при отклонениях напряжения на дуге в пределах от –6 до 7 %;

- разработана линейная функция управления скоростью движения электрода $v_{\text{эл}}$ (от –4 до 3 см/с) с использованием нечеткой логики Мамдани;
- направление и скорость движения электрода при различных значениях тока и напряжения были дефuzziфицированы на трехмерном графике с использованием сгенерированной 4-шаговой таблицы решений. По 3D-графику было определено, что при превышении силы тока электрической дуги до 37 кА электрод необходимо немедленно поднять со скоростью 4 см/с;
- удалось ограничить избыточное перемещение электродов благодаря линейному управлению скоростью движения электродов на основе оптимизации длины дуги; это обеспечило снижение поломок электродов и повышение энергоэффективности на 7 %.
- разработанная выше методика и алгоритм оценки на основе нечеткой логики модели Сугено показали, что удельное потребление электроэнергии было снижено с $d = 430$ кВт·ч/т до $d = 408$ кВт·ч/т. Это дало возможность сэкономить в среднем 660 кВт·ч электроэнергии при выплавке 30 т стали, что соответствует разнице в удельном расходе $\Delta d = 22$ кВт·ч/т.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Liu Y.-J., Chang G.W., Hong R.-C. Curve-fitting-based method for modeling voltage-current characteristic of an AC electric arc furnace // *Electr. Power Syst. Res.* – 2010. – Vol. 80. – № 7. – P. 807–814.
2. Ghiormez L., Prostean O. Electric arc current control for an electric arc furnace based on fuzzy logic // *Proceedings of the IEEE 10th Jubilee Int. Symp. on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI)*. – Timisoara (Romania), 21–23 May 2015. – P. 359–364.
3. Маслов Д.В. Определение основных параметров, влияющих на целостность электродных свечей в дуговых печах // *Электротехника*. – 2013. – № 8. – С. 43–47.
4. Moghadasian M., Al-Nasser E. Modelling and control of electrode system for an electric arc furnace // *2nd Int. Conf. on Research in Science, Engineering and Technology*. – Dubai, 2014. – P. 1–5. URL: <http://dx.doi.org/10.15242/ИЕ.E0314558> (дата обращения: 14.04.2024).
5. Математическое моделирование минимизации расходов электроэнергии промышленными предприятиями с непрерывным характером производства / И.У. Рахмонов, В.Я. Ушаков, А.М. Нажимова, К.К. Обидов, С.Р. Сулейманов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2024. – Т. 335. – № 4. – С. 43–51. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4423.
6. Fuzzy logic and PD control strategies of a three-phase electric arc furnace / L. Ghiormez, O. Prostean, M. Panoiu, C. Panoiu // *Int. Conf. on Computational Collective Intelligence (ICCCI-2016)*. – Sithonia, Greece, 28–30 Sept. 2016. – P. 509–517.
7. Electric arc furnace modeling with artificial neural networks and arc length with variable voltage gradient / R. Garcia-Segura, J. Vazquez Castillo, F. Martell-Chavez et al. // *Energies*. – 2017. – Vol. 10. – № 1424. – P. 1–11.
8. Paranchuk Y., Shabatura Y., Kuznyetsov O. The electrodes positioning control system for the electric arc furnace based on fuzzy logic // *Proc. IEEE Int. Conf. on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. – Kremenchuk, Ukraine, 21–24 Sept. 2021. – P. 1–5.
9. Wang L.-X., Mendel J.M. Back-propagation fuzzy system as nonlinear dynamic system identifiers // *Proc. IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems*. – San Diego, CA, USA, 8–12 March 1992. – P. 1409–1418.
10. Прогнозирование электропотребления с помощью нейронных сетей с LSTM / И.У. Рахмонов, В.Я. Ушаков, Н.Н. Ниёзов, Н.Н. Курбонов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2023. – Т. 334. – № 12. – С. 125–133. DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4407.
11. Effect of heat treatment on structure of carbon shell-encapsulated Pt nanoparticles for fuel cells / K. Davletbaev, S.S. Chougule, J. Min et al. // *Nanomaterials*. – 2024. – Vol. 14. – № 924. – P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano14110924>
12. Wang J. et al. Trap distribution and along-surface discharge characterization of aromatic compound-modified silicone gel // *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* – 2024. – P. 1–5. DOI: 10.1109/TDEI.2024.3456096.
13. Прогнозирование электропотребления с использованием метода главных компонент (PCA) / И.У. Рахмонов, В.Я. Ушаков, Н.Н. Ниёзов, Н.Н. Курбонов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2024. – Т. 335. – № 12. – С. 198–209. DOI: 10.18799/24131830/2024/12/4731.
14. Liu X. et al. A unified wind power prediction framework combined with individual wind turbine operation status and error correction // *Energy Rep.* – 2025. – P. 122–129. DOI: 10.1016/j.egyr.2025.05.065.
15. Mannanov U., Toshov J., Toshniyozov L. Perspective solutions for the design of drilling tools // *IVth Int. Innov. Mining Symp.* – 2019. – Vol. 105. – P. 1–8. DOI: 10.1051/e3sconf/201910503027.
16. Toshov J.B. The questions of the dynamics of drilling bit on the surface of well bottom // *Arch. Mining Sci.* – 2016. – Vol. 61. – № 2. – P. 279–287. DOI: 10.1515/amsc-2016-0020.
17. Математическая модель снижения потерь активной мощности регулированием реактивной мощности на предприятиях с непрерывным характером производства / И.У. Рахмонов, Н.Н. Ниёзов, К.Б. Ниматов и др. // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2025. – Т. 336. – № 2. – С. 159–171. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4730.
18. Paranchuk Y., Jancarczyk D., Falat P. Study and analysis of dynamics and energy efficiency of arc steelmaking furnace electrical mode with a fuzzy control algorithm // *Energies*. – 2023. – Vol. 16. – № 3451. – P. 1–20. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16083451>.
19. Маслов Д.В. Исследование механических процессов при ударе электрода с шихтой // *Наука. Технологии. Инновации: материалы Всерос. науч. конф. молодых ученых*. – Новосибирск: НГТУ, 2013. – Ч. 6. – С. 18–22.
20. Modeling and control of the hydraulic actuator in a ladle furnace / Y. Napoles-Baez, G. Gonzalez-Yero, R. Martínez et al. // *Heliyon*. – 2022. – Vol. 8. – P. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11857>.
21. Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Astashova G.V. Comparative analysis of electrode control systems of electric arc furnaces and ladle furnaces // *2nd Int. Conf. on Industrial Engineering, Applications, and Manufacturing (ICIEAM-2016)*. – 2016. – P. 1–7.
22. Panoiu M., Panoiu C., Deaconu S. Study about the possibility of electrodes motion control in the EAF based on adaptive impedance control // *Proc. 13th Int. Power Electron. Motion Control Conf. (EPE-PEMC 2008)*. – IEEE, 2008. – P. 741–746. DOI: 10.1109/EPEPEMC.2008.4635465.

Информация об авторах

Рахмонов И.У., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электроснабжения Ташкентского государственного технического университета, Узбекистан, 100095, г. Ташкент, ул. Университетская, 2, ilider1987@yandex.ru <http://orcid.org/0000-0003-2076-5919>

Коржобова М.Ф., докторант, кафедра электроснабжения Ташкентского государственного технического университета, Узбекистан, 100095, г. Ташкент, ул. Университетская, 2, mahzunaqorjobova@gmail.com <https://orcid.org/0009-0001-2959-9585>

Ушаков В.Я., заслуженный деятель науки и техники РФ, доктор технических наук, профессор Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, vyush@tpu.ru <https://orcid.org/0000-0003-2931-2086>

Хошимов Ф.А., доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения Ташкентского государственного технического университета, Узбекистан, 100095, г. Ташкент, ул. Университетская, 2, f0zildjan@yandex.com

Поступила в редакцию: 07.05.2025

Поступила после рецензирования: 19.06.2025

Принята к публикации: 04.08.2025

REFERENCES

1. Liu Y.-J., Chang G.W., Hong R.-C. Curve-fitting-based method for modeling voltage-current characteristic of an AC electric arc furnace. *Electric Power Systems Research*, 2010, vol. 80 (7), pp. 807–814.
2. Ghiormez L., Prostean O. Electric arc current control for an electric arc furnace based on fuzzy logic. *Proc. of the IEEE 10th Jubilee Int. Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI)*. Timisoara, Romania, May 21–23, 2015. pp. 359–364.
3. Maslov D.V. Determination of key parameters affecting the integrity of electrode columns in arc furnaces. *Elektrotehnika*, 2013, vol. 8, pp. 43–47. (In Russ.)
4. Moghadasian M., Al-Nasser E. Modelling and control of electrode system for an electric arc furnace. *2nd Int. Conf. on Research in Science, Engineering and Technology (ICRSET-2014)*. Dubai, UAE, March 21–22 2014. Available at: <http://dx.doi.org/10.15242/ПЕ.E0314558> (accessed: 14 April 2024).
5. Rakhmonov I.U., Ushakov V.Ya., Najimova A.M., Obidov K.K., Suleymanov S.R. Mathematical modeling for minimizing electricity consumption in industrial enterprises with continuous production. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 4, pp. 43–51. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4423.
6. Ghiormez L., Prostean O., Panoiu M., Panoiu C. Fuzzy logic and PD control strategies of a three-phase electric arc furnace. *Int. Conf. on Computational Collective Intelligence (ICCCI-2016)*. Sithonia, Greece, September 28–30, 2016. pp. 509–517.
7. Garcia-Segura R., Vazquez Castillo J., Martell-Chavez F., Longoria-Gandara O., Ortegón Aguilar J. Electric arc furnace modeling with artificial neural networks and arc length with variable voltage gradient. *Energies*, 2017, vol. 10, 1424, pp. 1–11.
8. Paranchuk Y., Shabatura Y., Kuznyetsov O. The electrodes positioning control system for the electric arc furnace based on fuzzy logic. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. Kremenchuk, Ukraine, September 21–24, 2021. pp. 1–5.
9. Wang L.-X., Mendel J.M. Back-propagation fuzzy system as nonlinear dynamic system identifiers. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems*. San Diego, CA, USA, March 8–12, 1992. pp. 1409–1418.
10. Rakhmonov I.U., Ushakov V.Ya., Niyozov N.N., Kurbonov N.N. Forecasting electricity consumption by LSTM neural network. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 12, pp. 125–133. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4407.
11. Davletbaev K., Chougule S.S., Min J., Ko K., Kim Y., Choi H., Choi Y., Chavan A.A., Pak B., Rakhmonov I.U. Effect of heat treatment on structure of carbon shell-encapsulated Pt nanoparticles for fuel cells. *Nanomaterials*, 2024, vol. 14, 924, pp. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano14110924>
12. Wang J. Trap distribution and along-surface discharge characterization of aromatic compound-modified silicone gel. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2024. pp. 1–5. DOI: 10.1109/TDEI.2024.3456096.
13. Rakhmonov I.U., Ushakov V.Ya., Niyozov N.N., Kurbonov N.N. Forecasting electricity consumption using the principal component analysis method. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 12, pp. 198–209. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2024/12/4731.
14. Liu X. A unified wind power prediction framework combined with individual wind turbine operation status and error correction. *Energy Reports*, 2025. pp. 122–129. DOI: 10.1016/j.egy.2025.05.065.
15. Mannanov U., Toshov J., Toshniyozov L. Perspective solutions for the design of drilling tools. *IVth Int. Innovative Mining Symposium*, 2019. 105, pp. 1–8. DOI: 10.1051/e3sconf/201910503027.
16. Toshov J.B. The questions of the dynamics of drilling bit on the surface of well bottom. *Archives of Mining Sciences*, 2016, vol. 61 (2), pp. 279–287. DOI: 10.1515/amsc-2016-0020.
17. Rakhmonov I.U., Niyozov N.N., Nimatov K.B., Ushakov V.Ya., Omonov F.B., Reymov K.M., Najimova A.M. Mathematical model of active power loss reduction via reactive power control in continuous production enterprises. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 2, pp. 159–171. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4730.
18. Paranchuk Y., Jancarczyk D., Falat P. Study and analysis of dynamics and energy efficiency of arc steelmaking furnace electrical mode with a fuzzy control algorithm. *Energies*, 2023, vol. 16 (3451), pp. 1–20. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16083451>
19. Maslov D.V. Study of mechanical processes during electrode impact with scrap. *Science. Technologies. Innovations: Proc. of the All-Russian Scientific Conf. of Young Scientists*. P. 6. Novosibirsk, NSTU Publ., 2013. pp. 18–22. (In Russ.)
20. Napoles-Baez Y., Gonzalez-Yero G., Martinez R., Valeriano Y., Nuñez-Alvarez J.R., Llosas-Albuera Y. Modeling and control of the hydraulic actuator in a ladle furnace. *Heliyon*, 2022, 8, e11857, pp. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11857>.
21. Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Astashova G.V. Comparative analysis of electrode control systems of electric arc furnaces and ladle furnaces. *2nd Int. Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM-2016)*, 2016. pp. 1–7.

22. Panoiu M., Panoiu C., Deaconu S. Study about the possibility of electrodes motion control in the EAF based on adaptive impedance control. *Proc. of the 13th Int. Power Electronics and Motion Control Conf. (EPE-PEMC 2008)*, 2008. pp. 741–746. DOI: 10.1109/EPEPMC.2008.4635465.

Information about the authors

Ikromjon U. Rakhmonov, Dr. Sc., Professor, Head of the Power Supply Department, Tashkent State Technical University, 2, Universitetskaya street, Tashkent, 100095, Uzbekistan, ilider1987@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0003-2076-5919>

Makhzuna F. Korjobova, PhD Student, Tashkent State Technical University, 2, Universitetskaya street, Tashkent, 100095, Uzbekistan, mahzunaqorjobova@gmail.com <https://orcid.org/0009-0001-2959-9585>

Vasily Ya. Ushakov, Honored Scientist of the Russian Federation, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation, vyush@tpu.ru <https://orcid.org/0000-0003-2931-2086>

Foziljon A. Hoshimov, Dr. Sc., Professor, Tashkent State Technical University, 2, Universitetskaya street, Tashkent, 100095, Uzbekistan, f0zildjan@yandex.com

Received: 07.05.2025

Revised: 19.06.2025

Accepted: 04.08.2025