

Научная статья  
Статья в открытом доступе  
УДК 101.01; 004.89  
doi: 10.30987/2782-5957-2026-3-24-35

## МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МЕХАТРОННЫХ УСТРОЙСТВ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО МОДУЛЯ ЗАЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТИ АЛЮМИНИЕВЫХ КАРТОЧЕК

Валех Азад оглы Мустафаев<sup>1✉</sup>, Малахат Насиман Салманова<sup>2</sup>, Кёнуль Ризван Алиева<sup>3</sup>,  
Рена Агабала Руфуллаева<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Сумгаитский государственный университет, Сумгаит, Азербайджан

<sup>1</sup> valex-sdu@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6754-9546>

<sup>2</sup> malaxat\_70@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1274-9900>

<sup>3</sup> konul.aliyeva1@sdu.edu.az; <https://orcid.org/0000-0003-3569-3241>

<sup>4</sup> rrufullayeva@list.ru

### Аннотация

Представлена сетевая модель функционирования мехатронных устройств автоматизированного модуля, предназначенного для прецизионной зачистки поверхности алюминиевых карточек. Учитывая асинхронный характер и стохастическую природу параллельных технологических процессов, авторы реализуют комплексный подход на стыке нечетких сетей Петри и экспертных производственных систем. В статье детально формализовано взаимодействие ключевых активных элементов: зачистного агрегата, системы технического зрения и промышленного робота.

Особое внимание уделено разработке алгоритма принятия решений для стабилизации температурного режима ламповой печи. Путем применения трапецевидных функций

принадлежности и формирования лингвистической базы правил установлена гибкая зависимость между скоростью движения конвейера и углом поворота вентиля серводвигателя. Научная новизна заключается в интеграции сетевого и производственного моделирования, что позволяет учитывать параллелизм и неопределенность параметров системы при дефиците точных математических данных. Полученные результаты имитационного моделирования подтверждают эффективность предложенного инструментария для проектирования и управления современными интеллектуальными производственными модулями.

**Ключевые слова:** модель, функция, принадлежность, температура, ламповая печь, серводвигатель, проектирование.

Ссылка для цитирования:

Мустафаев В. Модель функционирования мехатронных устройств производственного модуля зачистки поверхности алюминиевых карточек / В. Мустафаев, М Салманова, К. Алиева, Р. Руфуллаева // Транспортное машиностроение. – 2026. - № 3. – С. 24-35. doi: 10.30987/2782-5957-2026-3-24-35.

Original article  
Open Access Article

## ACTION MODEL OF MECHATRONIC DEVICES OF THE PRODUCTION MODULE FOR SURFACE CONDITIONING OF ALUMINUM CARDS

Valeh Azad oglu Mustafaev<sup>1✉</sup>, Malakhat Nasiman Salmanova<sup>2</sup>, Kenul Rizvan Aliyeva<sup>3</sup>, Rena Aghabala Ruffullaeva<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Sumgait State University, Sumgait, Azerbaijan

<sup>1</sup> valex-sdu@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6754-9546>

<sup>2</sup> malaxat\_70@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1274-9900>

<sup>3</sup> konul.aliyeva1@sdu.edu.az; <https://orcid.org/0000-0003-3569-3241>

<sup>4</sup> rrufullayeva@list.ru

## Abstract

A network action model of mechatronic devices of an automated module designed for precision surface conditioning of aluminum cards is presented. Given the asynchronous and stochastic nature of parallel technological processes, the authors implement an integrated approach at the interface of fuzzy Petri networks and expert product systems. The paper formalizes in detail the interaction of key active elements: a cleanup unit, a vision system and an industrial robot.

Special attention is paid to the development of a decision-making algorithm for stabilizing the temperature mode of a lamp furnace. By applying

trapezoidal membership functions and forming a linguistic rule base, a flexible relationship is established between the speed of the conveyor and the angle of rotation of the servomotor valve. The scientific novelty is in the integration of network and production modeling, which makes it possible to take into account the parallelism and uncertainty of system parameters with a lack of accurate mathematical data. The obtained results of modeling confirm the effectiveness of the proposed tools for the design and control of modern intelligent production modules.

**Keywords:** model, function, membership, temperature, lamp furnace, servomotor, design.

## Reference for citing:

Mustafaev V, Salmanova M, Alieva K, Ruffullayeva R. Action model of mechatronic devices of the production module for surface conditioning of aluminum cards. *Transport Engineering*. 2026;3:24-35. doi: 10.30987/2782-5957-2026-3-24-35.

## Введение

Одним из наиболее универсальных и адаптируемых подходов к исследованию сложных объектов является компьютерное моделирование, позволяющее эффективно проводить их оценку и анализ. При этом актуальной остается проблема построения универсальных имитационных моделей, способных настраиваться на любой объект из заданного класса [1, 2]. Это возможно в том случае, если структурные и функциональные характеристики некоторого класса объектов, отличающиеся одна от другой внутри класса, не входили в описание их функций, а служили бы легко заменяемыми исходными данными для моделирования. При этом необходим специальный подход к математическому описанию моделируемого объекта.

В [3, 4] определены особенности нечетких моделей и нечеткого моделирования. Уникальной особенностью таких моделей является то, что они должны обеспечивать гибкую стратегию обработки разнородных динамических взаимодействующих процессов, которые представляют данные и знания в существенно нечетком пространстве состояний объектов анализа. Динамические взаимодействующие процессы описываются так числовыми, так и лингвистическими переменными. В связи с этим можно утверждать, что нечеткие модели ориентированы на

моделирование конструкций, для которых характерно: функционирование на уровне лингвистических термов (нечетких множеств); характеристики системы могут быть изображены в том же самом лингвистическом формате; представление и обработка данных в условиях неопределенности.

Некоторая система может быть представлена набором нечетких моделей в зависимости от степени детализации нечетких множеств, которые используются для представления специализированной модели со средой моделирования. Степень детализации лингвистических представлений определяет объект исследований, а логика лингвистического представления процессов описывается уровнем логическо-ориентированных отношений. Логичность предложений структуры очевидна, однако она не предполагает реализацию отдельных моделей представления среды на различных иерархических уровнях с единой методологической базой и с единым математическим аппаратом, что не всегда разумно и существенно усложняет вычислительные процедуры и интерпретацию полученных результатов. Целью настоящего исследования является разработка модели функционирования мехатронных устройств производственного модуля зачистки поверхности алюминиевых карточек в условиях неопределенности.

Для эффективного решения данных задач необходим интегрированный системный подход, включающий разработку моделей с использованием актуальных методов моделирования и вычислительного интеллекта. Одним из

наиболее перспективных подходов является использование нечетких сетей Петри и методов нечеткого моделирования продукционных систем [5, 6].

## **Материалы, модели, эксперименты и методы Интеллектуальное управление модулем зачистки**

Технологическая цепочка изготовления алюминиевых испарителей начинается со склада заготовок, откуда рулон алюминиевого листа с помощью электромостового крана снимается с основания и устанавливается на разматыватель. Рабочий вручную заводит начало рулона в кривошипные ножницы, где происходит обрубка начала алюминиевого листа. После обрубки выполняется его правка на правильной машине и обрезка боковых кромок с помощью дисковых ножниц. Далее по специальному конвейеру алюминиевые листы транспортируются к правильной машине, откуда пакет листов размерами 1000×2000 мм укладываются с помощью тельфера на стол. После этого листы поштучно подаются на кривошипные ножницы, на которых производится резка их на полосы соответствующих размеров. Ножницы оборудованы упором и направляющей линейкой, расположенной под прямым углом к ножницам. Прижим и стол у ножниц покрыты текстолитом, предохраняющими поверхность листов от царапин. Правильность установки заднего упора ножниц контролируется путем резки полос на парные длины с последующей проверкой их размеров складным методом. После отжига предусмотрена операция зачистки поверхности карточек, производимая с целью обеспечения их качественной сварки. Зачистка осуществляется на станках типа ЗПКИ-1. Предусмотрена зачистка только одной из сторон карточки.

Рассмотрим функционирование ГПМ зачистки поверхности карточек [7]. В состав ГПМ входят: зачистная машина (ЗМ) предназначенная для выполнения технологической операции зачистки поверхности карточек; входной и выходной накопители, обеспечивающие

хранения карточек соответственно до и после операции зачистки; устройство технического зрения (УТЗ) для определения качества операций зачистки поверхности карточек; ПР выполняющий операции загрузки накопителей брака, исправимого брака и зачищенных карточек, ламповой печь для сушки зачищенных карточек

Модуль функционирует следующим образом: при наличии карточек во входном накопителе ЗМ, включается толкатель, и карточка подается в рабочую зону зачистного устройства, где выполняется технологическая операция зачистки поверхности; начальное и конечное состояние толкателя фиксируются; по завершении операции, зачищенные карточки перемешаются в зону выходного накопителя. При обнаружении заготовки в зоне выходного накопителя, УТЗ приступает к диагностике и осуществляет нечеткую оценку состояния изделия, вычисляя значения функции принадлежности для его классификации. В рамках предложенной модели установлены следующие критерии: интервал от 0 до 0,5 определяет полную пригодность (допуск), диапазон (0,5; 0,8) сигнализирует о наличии исправимых дефектов, а показатели в границах (0,8; 1) соответствуют окончательному браку. По завершении операции контроля качества, зачищенные карточки загружаются в соответствующие накопители в зависимости от присвоенного им статуса.

Нечеткие модели функционирования активных элементов ГПМ зачистки поверхности карточек представляется в виде нечетких СП. Нечеткие СП определяется в виде:  $N = (P, T, I, O, \mu)$ , где  $P = \{p_i\}$  ( $i=1, \dots, n$ ;  $n$  – число позиций) – нечеткое множество

позиций;  $T = \{t_j\}$  ( $j=1, \dots, m$ ;  $m$  – число переходов) – нечеткое множество, включающее переходов, ответственных за смену состояний;  $I: P \times T \rightarrow (0, 1, \dots)$ ;  $O: T \times P \rightarrow (0, 1, \dots)$  – соответственно функции входных и выходных инцидентов, определяющие топологию сети; отображение  $\mu: P$  – ставит в соответствие каждой позиции  $\mu(p_i)$  вектор распределения степеней принадлежности фишек, варьирующийся в диапазоне  $[0,1]$ . Для повышения эффективности анализа и решения прикладных задач в источниках рекомендуется использовать матричную форму представления структуры НСП. Элементы матриц входных  $f_{ij}$ , выходных  $h_{ij}$  и инцидентов  $d_{ij}$  определяются следующим образом:

$$f_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if } p_i \in I(t_j); \\ 0, & \text{if } p_i \notin I(t_j); \end{cases}$$

$$h_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if } p_i \in O(t_j); \\ 0, & \text{if } p_i \notin O(t_j); \end{cases}$$

$$d_{ij} = \begin{cases} -1, & \text{if } p_i \in I(t_j) \text{ and } p_i \notin O(t_j); \\ 1, & \text{if } p_i \notin I(t_j) \text{ and } p_i \in O(t_j); \\ 0, & \text{if } p_i \notin I(t_j) \text{ and } p_i \notin O(t_j). \end{cases}$$

Множество позиции:  $p_1$  – наличие карточки во входном накопителе ЗМ;  $p_2$  – отсутствие карточки во входном накопителе ЗМ;  $p_3$  – ЗМ выполняет

операцию зачистки;  $p_4$  – наличие карточки в выходном накопителе ЗМ;  $p_5$  – отсутствие карточки в выходном накопителе ЗМ;  $p_6$  – УТЗ в исходном состоянии;  $p_7$  – УТЗ выполняет операцию контроля качества зачистки поверхности карточки;  $p_8$  – УТЗ в конечном состоянии;  $p_9$  – на выходном накопителе ЗМ на поверхности карточки брак не обнаружено;  $p_{10}$  – на выходном накопителе ЗМ на поверхности карточки обнаружен исправимый брак;  $p_{11}$  – на выходном накопителе ЗМ на поверхности карточки обнаружен неисправимый брак;  $p_{12}$  – ПР в исходном состоянии;  $p_{13}$  – загружается накопитель зачищенных карточек;  $p_{14}$  – загружается накопитель карточек с исправимым браком;  $p_{15}$  – загружается накопитель карточек с неисправимым браком.

Множество переходов:  $t_1$  – передача карточки для выполнения операции зачистки;  $t_2$  – загрузка входного накопителя ЗМ;  $t_3$  – завершения операции зачистки ЗМ;  $t_4$  – включение УТЗ;  $t_5$  – завершения операции контроля качества зачистки поверхности карточки УТЗ;  $t_6$  – отключение УТЗ;  $t_7$  – включение ПР;  $t_8$  – отключение ПР.

Функции входной и выходной инцидентности представляются соответственно матрицами  $F$  и  $H$ :

$$F = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$H = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Элементы матрицы инцидентности вычисляются по формуле:

$$d_{ij} = h_{ij} - f_{ij}, i = \overline{1,15}; j = \overline{1,8}.$$

$$D = \begin{vmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{vmatrix}$$

Начальная маркировка  $\mu_0$  представляется векторами:

$$\begin{aligned} \mu(0,1) &= (1.000,0.000); \mu(0,2) = (1.000,0.000); \mu(0,3) = (1.000,0.000); \\ \mu(0,4) &= (1.000,0.000); \mu(0,5) = (1.000,0.000); \mu(0,6) = (1.000,0.000); \\ \mu(0,7) &= (0.200,0.300,0.500); \mu(0,8) = (0.000,0.400,0.600); \\ \mu(0,9) &= (0.200,0.600,0.100,0.100); \mu(0,10) = (0.100,0.500,0.400,0.000); \\ \mu(0,11) &= (0.100,0.400,0.500,0.000); \mu(0,12) = (0.000,0.000,0.000,1.000); \\ \mu(0,13) &= (0.000,0.400,0.600,0.000); \mu(0,14) = (0.000,0.200,0.000,0.800); \\ \mu(0,15) &= (0.000,0.300,0.500,0.200) \end{aligned}$$

На основе разработанного алгоритма [7] вычисляются элементы матрица Грамма и вектора диагональной сверки нечетких СП. В результате компьютерного эксперимента получена

последовательность срабатывание переходов  $\sigma = (t_1 t_3 t_2 t_4 t_5 t_6 t_7 t_8)$  из начальной маркировки  $\mu_0$ :

срабатывается переход  $t_1$ , полученная маркировка имеет вид:

$$\begin{aligned} \mu(1,2) &= (0.500,0.500); \mu(1,1) = (1.000,0.000); \mu(1,3) = (0.500,0.500); \\ \mu(1,4) &= (1.000,0.000); \mu(1,5) = (1.000,0.000); \mu(1,6) = (1.000,0.000); \\ \mu(1,7) &= (0.200,0.300,0.500); \mu(1,8) = (0.000,0.400,0.600); \\ \mu(1,9) &= (0.200,0.600,0.100,0.100); \mu(1,10) = (0.100,0.500,0.400,0.000); \\ \mu(1,11) &= (0.100,0.400,0.500,0.000); \mu(1,12) = (0.000,0.000,0.000,1.000); \\ \mu(1,13) &= (0.000,0.400,0.600,0.000); \mu(1,14) = (0.000,0.200,0.000,0.800); \\ \mu(1,15) &= (0.000,0.300,0.500,0.200); \text{ и т.д.}; \end{aligned}$$

срабатывается переход  $t_8$ , полученная маркировка имеет вид:

$$\begin{aligned} \mu(8,1) &= (0.500,0.500); \mu(8,2) = (0.500,0.500); \mu(8,3) = (0.500,0.500); \\ \mu(8,4) &= (0.500,0.500); \mu(8,5) = (0.500,0.500); \mu(8,6) = (0.500,0.500); \\ \mu(8,7) &= (0.300,0.300,0.400); \mu(8,8) = (0.200,0.400,0.400); \\ \mu(8,9) &= (0.300,0.600,0.100,0.000); \mu(8,10) = (0.000,0.500,0.400,0.100); \\ \mu(8,11) &= (0.000,0.500,0.500,0.000); \mu(8,12) = (0.000,0.500,0.500,0.000); \\ \mu(8,13) &= (0.100,0.400,0.500,0.000); \mu(8,14) = (0.100,0.200,0.000,0.700); \\ \mu(8,15) &= (0.100,0.300,0.500,0.100). \end{aligned}$$

Таким образом, представленные правила срабатывания переходов

полностью описывают процесс функционирования нечетких СП.

## Модель принятия решений для регулирования ламповой печи цепного конвейера

Обозначения  $A$ ,  $B$  и  $C$  используются для представления нечетких входных и выходных лингвистических переменных в составе продукционных правил. Они формализуют такие технологические и управляющие параметры, как температура печи отжига, скорость перемещения транспортного манипулятора и угол положения направляющего серводвигателя. Указанные параметры интерпретируются в терминах соответствующих нечетких переменных и служат основой для построения правил нечеткого вывода. Множества  $X_1$ ,  $X_2$  и  $X_3$  задают универсальные области определения соответствующих входных и выходных переменных, в пределах которых формируются нечеткие подмножества и определяются функции принадлежности. Такое представление обеспечивает формальную связь между физическими параметрами управляемого объекта и их лингвистическими описаниями в нечеткой системе принятия решений [8].

Продукционные правила модели принятия решений для модуля печи отжига алюминиевых карточек формализуются в виде системы нечетких правил типа «ЕСЛИ–ТО», отражающих взаимосвязь между температурным режимом печи, скоростью перемещения транспортного манипулятора и управляющим воздействием на направляющий серводвигатель. Данная система обеспечивает адаптивное регулирование положения серводвигателя в условиях технологической неопределенности. Правила нечеткого вывода формулируются следующим образом:

1. Если температура печи отжига совпадает с допуском, и скорость перемещение транспортного манипулятора совпадает нормальной, близко к нормальной, то повернуть угол положение направляющего серводвигателя близко к нулю;

2. Если температура печи отжига чуть ниже допускаемой, и скорость перемещение транспортного манипулятора имеет отрицательное отклонение, близкое

к нормальному, то не изменять угол положение направляющего серводвигателя;

3. Если температура печи отжига чуть выше допуска, и скорость перемещение транспортного манипулятора имеет положительное отклонение, близкое к нормальному, то не изменять угол положение направляющего серводвигателя;

4. Если температура печи отжига ниже допуска и скорость перемещение транспортного манипулятора совпадает с нормальным, близкое к нормальной, то повернуть угол положения направляющего серводвигателя на небольшой угол влево;

5. Если температура печи отжига выше допуска, и скорость перемещение транспортного манипулятора совпадает с нормальным, близкое к нормальному, то повернуть угол положения направляющего серводвигателя на небольшой угол влево;

6. Если температура печи отжига существенно ниже допуска, и скорость перемещение транспортного манипулятора совпадает с нормальным, близкое к нормальному, то повернуть угол положение направляющего серводвигателя на небольшой угол влево;

7. Если температура печи отпуска существенно выше допуска, и скорость перемещение транспортного манипулятора совпадает с нормальным, близкое к нормальному, то повернуть угол положение направляющего серводвигателя на небольшой угол вправо;

8. Если температура печи отжига максимально ниже допуска, и скорость перемещение транспортного манипулятора совпадает с нормальным, близкое к нормальному, то повернуть угол положение направляющего серводвигателя на большой угол влево;

9. Если температура печи отжига максимально выше допуска, и скорость перемещение транспортного манипулятора совпадает с нормальным, близкое к нормальному, то повернуть угол положение направляющего серводвигателя на большой угол вправо.

## Результаты

Для фаззификации входных лингвистических переменных «температура печи отжига», «скорость перемещение транспортного манипулятора» использована трапециевидная функция принадлежности [9, 10]. В качестве терм-множества всех входных лингвистических переменных используется следующие множества:

$T_1 =$  (в пределах допуска; чуть ниже допуска; ниже допуска; существенно ниже допуска; максимально ниже допуска; чуть выше допуска; выше допуска; существенно выше допуска; максимально выше допуска);

$T_2 =$  (нормальное, близко к нормальной; отрицательно, близко к нормальной, положительно, близко к нормальной).

В качестве терм-множества выходного лингвистического переменного «угол положения направляющего серводвигателя» используется следующее множество:

$T_3 =$  (большой угол влево; небольшой угол влево; ноль, близко к нулю; небольшой угол вправо; большой угол вправо).

Реализована процедура фаззификации всех подусловий, соответствующих входным лингвистическим переменным. Для преобразования термов лингвистической переменной  $A$  в нечеткую форму в пределах её универсального множества выбраны функции принадлежности (рис. 1) в универсуме  $X_1=[0,30]$  и определены следующие нечёткие множества:  $A_1=[0,0,2,4]$  – максимально ниже допуска;  $A_2=[2,4,6,8]$  – существенно ниже допуска;  $A_3=[6,8,10,12]$  – чуть ниже допуска;  $A_4=[10,12,14,16]$  – ниже допуска;  $A_5=[14,16,18,20]$ – в пределах допуска;  $A_6=[18,20,22,24]$  – чуть выше допуска;  $A_7=[22,24, 26, 28]$  – выше допуска;  $A_8=[26,28, 29, 30]$  – существенно выше допуска;  $A_9=[28,30, 30, 30]$  – максимально выше допуска.

На рис. 1 показано интерактивное окно, с помощью которого фаззифицируются все термы лингвистической переменной «температура печи отжига». Для формирования нечетких подмножеств применены трапециевидные функции принадлежности, заданные в универсуме  $[0,30]$ .

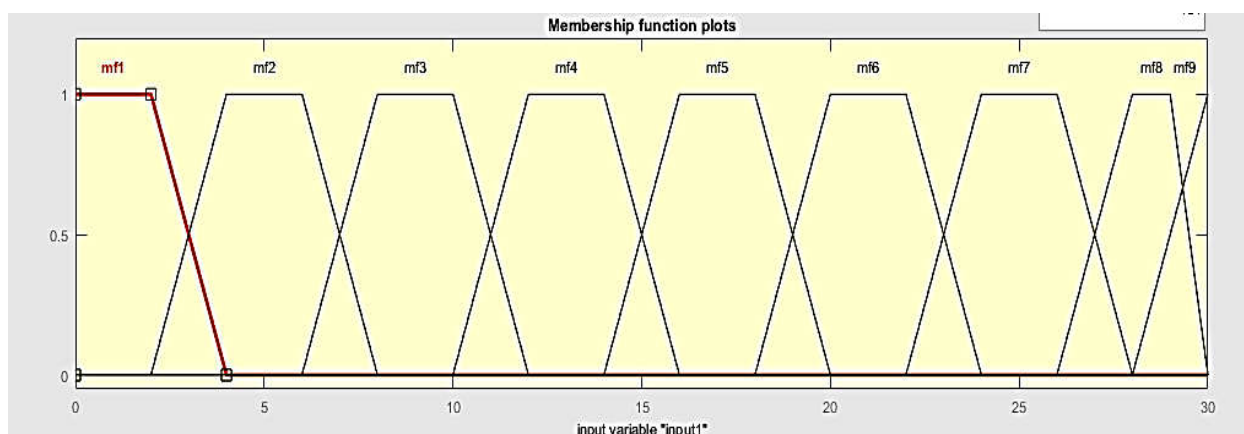


Рис. 1. График функции принадлежности входной лингвистической переменной «температура печи отжига»  
 Fig. 1. Membership function of the input linguistic variable “annealing furnace temperature”

Для фаззификации термов лингвистической переменной  $B$  выбраны функции принадлежности (рис. 2) в универсуме  $X_2=[0,20]$  и определены следующие нечёткие множества:  $B_1=[0,0,5,10]$  – отрицательно, близко к

нормальной;  $B_2=[5,10,15,20]$  – нормальное, близко к нормальной;  $B_3=[15,20,20,20]$  – положительно, близко к нормальной.

На рис. 2 представлено интерактивное окно, через которое

фаззифицируются всех термов лингвистической переменной «скорость движения транспортного манипулятора»

по средствам трапецевидных функции принадлежности на универсуме [0,20].

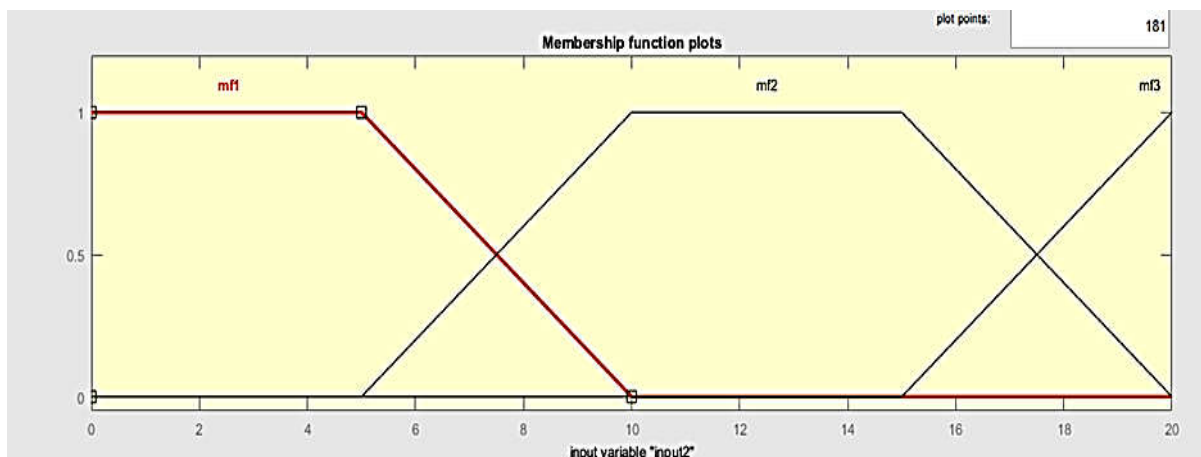


Рис. 2. График функции принадлежности входной лингвистической переменной «скорость движения транспортного манипулятора»

Fig. 2. Membership function of the input linguistic variable “transport manipulator”

Для фаззификации термов выходной лингвистической переменной С выбраны функции принадлежности (рис. 3) в универсуме  $X_3=[0,90]$  и определены следующие нечёткие множества:  $C_1=[0,0,10,20]$ -большой угол влево;  $C_2=[10,20,30,40]$  - небольшой угол влево;  $C_3=[30,45,55,60]$ - нуль, близко к нулю;  $C_4=[55,70, 80,85]$  - небольшой угол вправо;

$C_5=[80,90,90,90]$  – большой угол вправо.

На рис. 3 показано интерактивное окно фаззификации термов лингвистической переменной «угол поворота вентиля серводвигателя» [11], реализованной на основе трапецевидных функций принадлежности на универсуме

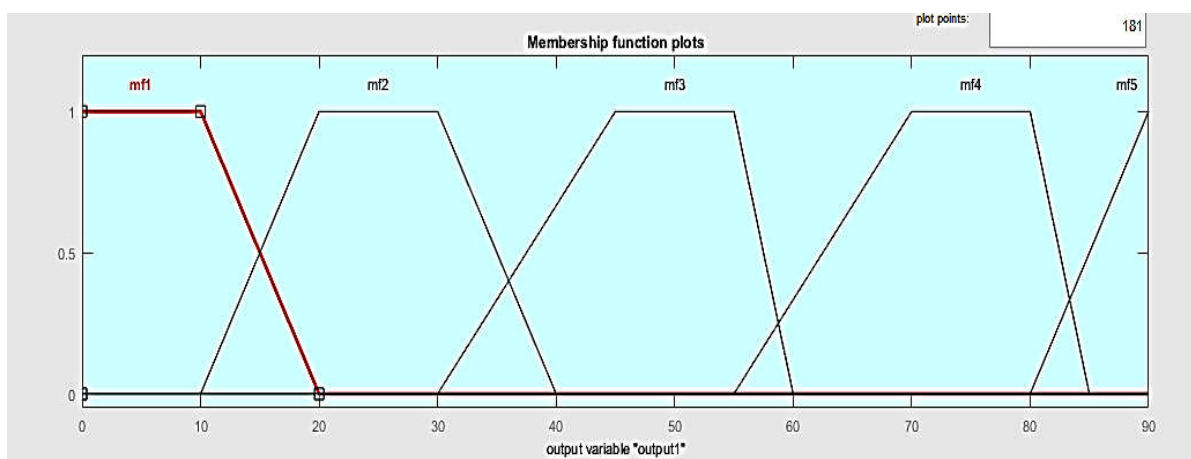


Рис. 3. График функции принадлежности выходной лингвистической переменной «угол поворота вентиля серво-двигателя»

Fig. 3. Membership function of the output linguistic variable “servo motor valve rotation angle”

Нечёткие множества, соответствующие элементам множества

термов входной лингвистической переменной А можно представит в виде:

$$\begin{aligned} \check{A}_1(x) &= \{(2/0), (1.5/1), (1/2), (0.5/3), (0/4)\}; \\ \check{A}_2(x) &= \{(0/2), (0.5/3), (2/4), (1.5/5), (0.75/6), (0.5/7), (0/8)\}; \\ \check{A}_3(x) &= \{(0/6), (0.5/7), (2/8), (1.5/9), (1/10), (0.5/11), (0/12)\}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{A}_4(x) &= \{(0/10), (0.5/11), (2/12), (1.5/13), (1/14), (0.5/15), (0/16)\}; \\ \tilde{A}_5(x) &= \{(1/14), (0.5/15), (0/16), (0/17), (0/18), (0/19), (0/20)\}; \\ \tilde{A}_6(x) &= \{(0/18), (0.5/19), (2/20), (1.5/21), (1/22), (0.5/23), (0/24)\}; \\ \tilde{A}_7(x) &= \{(0/22), (0.5/23), (2/24), (1.5/25), (1/26), (0.5/27), (0/28)\}; \\ \tilde{A}_8(x) &= \{(0/26), (0.5/27), (2/28), (1/29), (0/30)\}; \\ \tilde{A}_9(x) &= \{(0/28), (0.5/29), (0/30)\}. \end{aligned}$$

Нечеткие множества, соответствующие элементам множества термов входной лингвистической переменной  $B$  можно представить в виде:

$$\begin{aligned} \check{B}_1(x) &= \{(2/0), (1.8/1), (1.6/2), (1.4/3), (1.2/4), (1/5), (0.8/6), (0.6/7), (0.4/8), (0.2/9), (0/10)\}; \\ \check{B}_2(x) &= \{(1/5), (0.8/6), (0.6/7), (0.4/8), (0.2/9), (0/10), (0/11), (0/12), (0/13), (0/14), (0/15), (0/16), (0/17), (0/18), (1/19), (0/20)\}; \\ \check{B}_3(x) &= \{(1/15), (0.8/16), (0.6/17), (0.4/18), (0.2/19), (0/20)\}. \end{aligned}$$

Нечеткие множества, соответствующие элементам множества термов выходной лингвистической переменной  $C$  можно представить в виде:

$$\begin{aligned} \check{C}_1(x) &= \{(1/10), (0.5/15), (0/20), (0/25), (0/30), (0/35), (0/40), \}; \\ \check{C}_2(x) &= \{(1/10), (0.5/15), (0/20), (0/25), (0/30), (0/35), (0/40)\}; \\ \check{C}_3(x) &= \{(0/30), (0/35), (0/40), (0/45), (0/50), (0/55), (0/60)\}; \\ \check{C}_4(x) &= \{(0/55), (0/60), (0/65), (0/70), (0/75), (0/80), (0/85)\}; \\ \check{C}_5(x) &= \{(0/80), (0/85), (0/90)\}. \end{aligned}$$

Для проведения комплексного анализа созданной системы интеллектуального управления была сформирована трехмерная поверхность нечеткого вывода (рис. 4), наглядно

демонстрирующая характер нелинейной зависимости между входными параметрами и результирующим управляющим сигналом.

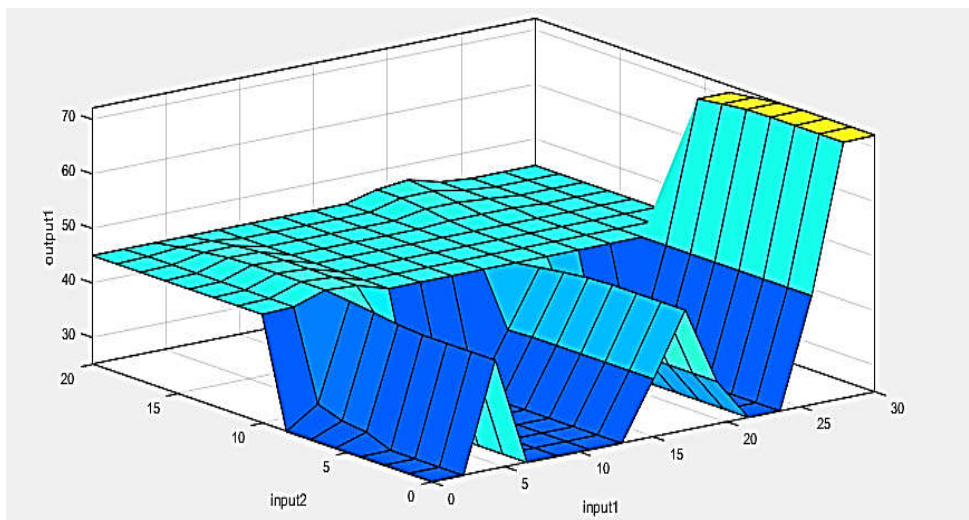


Рис. 4. Трехмерное изображение результата дефаззификации выходных переменных «угол поворота вентиля серво-двигателя»

*Fig. 4. 3D representation of the defuzzification result of the output variable "servo motor valve rotation angle"*

## Заключение

Разработана модель функционирования мехатронных устройств модуля за-

чистки поверхности карточек в производственной системе алюминиевых ис-

парителей [12]. Определена структура модели, и в результате компьютерного моделирования получена последовательность достижимых срабатывающих переходов. Разработана модель принятия решений для регулирования температуры ламповой печи в условиях неопределённости. В ходе исследования на основе нечеткой логики была разработана модель регулирования температуры в печи для сушки алюминиевых карточек после их очистки. Особое внимание в работе уделено интеллектуальному управлению температурным режимом ламповой печи. Созданная экспертная база из 9 нечетких правил позволила связать скорость движения транспортного манипулятора и те-

кущую температуру с углом поворота серводвигателя. Использование трапецевидных функций принадлежности обеспечило точную фаззификацию входных параметров на заданных универсумах.

Полученные результаты показывают, что предложенная модель при регулировании температуры печи в определённых условиях может иметь практическое значение для оперативной оценки эффективности управления и открывают широкие возможности для автоматизации гибких производственных модулей в электронной промышленности и производстве теплообменного оборудования.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Mai T. V., Alattas K. A., Bouteraa Y., Rahmani R., Fekih A., Mobayen S., Assawinchaichote W. Optimized fuzzy enhanced robust control design for a Stewart parallel robot // *Mathematics*. 2022. Vol. 10, No. 11. P. 1917. DOI: 10.3390/math10111917.
2. Phan B. K. Application of fuzzy logic in robot control for mechanical processing. *ResearchGate*, 2025. DOI:10.15625/2525-2518/18069
3. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzy TECH. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 717 с.
4. Борисов В. В., Круглов В. В., Федулов Ф. С. Нечеткие модели и сети. М.: Телеком, 2012. 725 с. (Borisov V. V., Kruglov V. V., Fedulov F. S. Fuzzy models and networks. Moscow: Telekom, 2012. 725 pp.) (in Russian)
5. Li Z., Zhou M., Wu N. A Survey and Comparison of Petri Net-Based Deadlock Prevention Policies for Flexible Manufacturing Systems // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*. 2008. Vol. 38, No. 2. P. 173–188. DOI: 10.1109/TSMCC.2007.913920.
6. Ahmedov M. A., Mustafayev V. A., Atayev G. N., Rahimov Sh. R. Simulation of dynamic enterprise processes with application of the modified fuzzy Petri net // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2017. Vol. 502. P. 913-921.
7. Mustafayev V. A., Zeynalabdiyeva I. S., Kravets O. J. Control model of parallel functioning

- production modules as fuzzy Petri nets // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. P. 1074-1079. DOI:10.1088/1742-6596/2094/2/022003.
8. Vasu Murthy B., Pavan Kumar Y. V., Ratna Kumari U. V. Fuzzy logic intelligent controlling concepts in industrial furnace temperature process control // 2012 IEEE International Conference on Advanced Communication Control and Computing Technologies (ICACCCT). Ramanathapuram, India, 2012. P. 353-358. DOI: 10.1109/ICACCCT.2012.6320801.
9. Mustafayev V., Salmanova M., Budaqov I. Decision-making model for determining the intensity of a processing center under conditions of uncertainty // 2024 10th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT). IEEE, 2024. P. 217-222, doi: 10.1109/CoDIT62066.2024.10708297.
10. Anjaneyulu S. S. S. R., Rajasekaran K. S. Design and implementation of fuzzy control for industrial robots // *International Journal of Computer Applications*. 2012. Vol. 47, No. 17. P. 1-5. DOI: 10.5120/7444-0107.
11. H.B. Guliyev, Z.I. Farkhadov, J.F. Mammadov System of automatic regulation of reactive power by means of fuzzy logic. *Reliability: Theory & Applications* 10 (2 (37)), 2015.- p. 50-58.
12. J. Mammadov, E. Huseynov, N. Talibov, T. Akhmadova, G. Ganjaliev Development of program tool for expert assessment of innovation projects in the scientific technopark., *IFAC-PapersOnLine* 51 (30), 2018. p. 571-574.

## REFERENCES

1. Mai TV, Alattas KA, Bouteraa Y, Rahmani R, Fekih A, Mobayen S, Assawinchaichote W. Optimized fuzzy enhanced robust control design

- for a Stewart parallel robot. *Mathematics*. 2022;10(11):1917. DOI: 10.3390/math10111917.

2. Phan BK. Application of fuzzy logic in robot control for mechanical processing. ResearchGate; 2025. DOI:10.15625/2525-2518/18069
3. Leonenkov AV. Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzy TECH. St. Petersburg: BHV-Petersburg; 2005.
4. Borisov VV, Kruglov VV, Fedulov FS. Fuzzy models and networks. Moscow: Telecom; 2012.
5. Li Z, Zhou M, Wu N. A Survey and Comparison of Petri Net-Based Deadlock Prevention Policies for Flexible Manufacturing Systems. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews). 2008;38(2):173–188. DOI: 10.1109/TSMCC.2007.913920.
6. Ahmedov MA, Mustafayev VA, Atayev GN, Rahimov ShR. Simulation of dynamic enterprise processes with application of the modified fuzzy Petri net. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2017;502:913-921.
7. Mustafayev VA, Zeynalabdiyeva IS, Kravets OJ. Control model of parallel functioning production modules as fuzzy Petri nets. Journal of Physics: Conference Series. 2021:1074-1079. DOI:10.1088/1742-6596/2094/2/022003.
8. Vasu MB, Pavan Kumar YV, Ratna Kumari UV. Fuzzy logic intelligent controlling concepts in industrial furnace temperature process control. 2012 IEEE International Conference on Advanced Communication Control and Computing Technologies (ICACCCT). Ramanathapuram: India; 2012. DOI: 10.1109/ICACCCT.2012.6320801.
9. Mustafayev V, Salmanova M, Budaqov I. Decision-making model for determining the intensity of a processing center under conditions of uncertainty. 2024 10th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT). IEEE; 2024. doi: 10.1109/CoDIT62066.2024.10708297.
10. Anjaneyulu SSSR, Rajasekaran KS. Design and implementation of fuzzy control for industrial robots. International Journal of Computer Applications. 2012;47(17):1-5. DOI: 10.5120/7444-0107.
11. Guliyev HB, Farkhadov ZI, Mammadov JF. System of automatic regulation of reactive power by means of fuzzy logic. Reliability: Theory and Applications. 2015;10(2 (37)):50-58.
12. Mammadov J, Huseynov E, Talibov N, Akhmadova T, Ganjaliyeva J. Development of program tool for expert assessment of innovation projects in the scientific technopark. IFAC-PapersOnLine. 2018;51(30):571-574.

#### Информация об авторах:

**Мустафаев Валех Азад оглы** – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологий преподавания математики и информатики» Сумгаитского государственного университета, AZ5008, тел +994505342506.

**Салманова Малахат Насиман** – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Технологии преподавания математики

**Mustafaev Valeh Azad oglu** – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Technologies to Teach Mathematics and Computer Science at Sumgait State University, AZ5008, phone: +994505342506.

**Salmanova Malakhat Nasiman** – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer at the Department of Technologies to Teach Mathematics

и информатики» Сумгаитского государственного университета, тел +994507562828.

**Алиева Кёнуль Ризван** – преподаватель кафедры «Технологии преподавания математики и информатики» Сумгаитского государственного университета, тел +994773622223.

**Руфуллаева Рена Агабала** – диссертант кафедры «Информационных технологий» Сумгаитского государственного университета.

and Computer Science at Sumgait State University, phone: +994507562828.

**Alieva Kenul Rizvan** – Lecturer at the Department of Technologies to Teach Mathematics and Computer Science at Sumgait State University, phone: +994773622223.

**Rufullaeva Rena Aghabala** – Candidate for the degree at the Department of Information Technologies at Sumgait State University.

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.**  
**Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**  
**The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья опубликована в режиме Open Access.**  
**Article published in Open Access mode.**

Статья поступила в редакцию 08.01.2026; одобрена после рецензирования 05.02.2026; принята к публикации 27.02.2026. Рецензент – Сьянов С.Ю., кандидат технических наук, доцент Брянского государственного технического университета, заместитель главного редактора журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 08.01.2026; approved after review on 05.02.2026; accepted for publication on 27.02.2026. The reviewer is Syanov S.Yu., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Bryansk State Technical University, Deputy Editor-in-Chief of the journal *Transport Engineering*.



**Продолжается подписка на научно-технический журнал  
«Транспортное машиностроение» на 2026 год**

Подписку на журнал можно оформить в любом почтовом отделении или непосредственно в редакции журнала. Подписные индексы по интернет-каталогу «Пресса по подписке» – Э80859 – [https://www.akc.ru/itm/vestnik-bry\\_anskogo-gosudarstvennogo-tehnic\\_heskogo-universiteta/](https://www.akc.ru/itm/vestnik-bry_anskogo-gosudarstvennogo-tehnic_heskogo-universiteta/) и Объединенному каталогу «Пресса России» – 80859.

Стоимость подписки на минимальный срок – от 4846 руб.

Информация об опубликованных статьях регулярно направляется в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) – <https://www.elibrary.ru/contents.asp?titleid=79505>.

Сайт электронной редакции журнала: <https://bstu.editorum.ru/ru/nauka/journal/169/view>

E-mail: [trans-eng@tu-bryansk.ru](mailto:trans-eng@tu-bryansk.ru).

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук (категория К2) по группам научных специальностей:

2.5. Машиностроение (2.5.2; 2.5.3; 2.5.5; 2.5.6; 2.5.8),

2.6. Химические технологии, науки о материалах, металлургия (2.6.1; 2.6.17),

2.9. Транспортные системы (2.9.1; 2.9.3; 2.9.5).