

# Модель принятия решений для управления параллельно функционирующими мехатронными устройствами

М. Н. Салманова, К. Р. Алиева, Р. А. Руфуллаева

В представленной работе рассматривается разработка модели принятия решений для управления параллельно функционирующим мехатронным устройством (промышленным роботом). Создана база нечётких производственных правил, определены входные и выходные лингвистические переменные и реализована процедура фазификации. С применением алгоритма Мамдани вычислены конкретные значения функций принадлежности входных и выходных переменных. В результате визуализации поверхности нечёткого вывода установлена зависимость между входными и выходными лингвистическими переменными.

*Управление; промышленный робот; производственные правила; фазификация; нечёткий вывод,*

## ВВЕДЕНИЕ

В теории моделирования систем значительный интерес представляют математические средства моделирования и анализа сложных параллельных и распределённых систем, к которым относятся модели технологических процессов. При разработке подобных систем высок риск возникновения ошибок на стадии проектирования, а также высока цена их проявления на стадии эксплуатации. Всё это обуславливает интерес к формальным математическим средствам анализа и верификации.

Актуальность разработки систем управления определяется развитием высоких технологий автоматизации и информатизации технологических процессов, основанных на фундаментальных и усовершенствованных формальных математических методах, что способствует повышению эффективности управления.

Модели динамических процессов могут описываться дифференциальными и интегральными уравнениями в непрерывном времени, уравнениями в конечных разностях, а также конечными автоматами в дискретном времени. В нерегулярном (событийном) времени события в системе происходят лишь в отдельные моменты, изменяя её состояние, поэтому такие процессы сложно поддаются аналитическому описанию. В подобных случаях наиболее мощными инструментами являются сетевые автоматы и производственные системы.

Моделирование с использованием сетевых автоматов и производственных систем в значительной степени ориентировано на детерминированные и стохастические процессы, что не позволяет в явном виде учитывать параллелизм и динамику взаимодействия, а также описывать множество параметров и особенностей предметной области.

Объектом управления современных технологических систем являются конкретные технологические процессы, которые можно представить в виде множества действий, условий

и связей [Cap07, Mai22, Mir24]. Построение моделей систем в виде нечётких производственных правил основывается на множестве событий и условий, а также на некоторых очевидных причинно-следственных связях [Бор12, Pha25]. В параллельных системах, как правило, невозможно заранее определить все возможные траектории функционирования [Пет21, Opr24]. Поэтому для повышения качества разработки применяется верификация модели на соответствие заранее сформулированным требованиям [Anj12].

### СОЗДАНИЕ БАЗЫ НЕЧЕТКИХ ПРОДУКЦИОННЫХ ПРАВИЛ ПАРАЛЛЕЛЬНО ФУНКЦИОНИРУЮЩИХ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ

Моделирование, основанное на экспертных знаниях о системе, представляет собой один из первых практических подходов к нечёткому моделированию. Основу данного подхода составляет использование знаний и опыта специалиста, глубоко компетентного в вопросах, связанных с исследуемой системой.

В процессе наблюдения за системой или при выполнении технологических операций эксперт формирует определённые знания о её функционировании. Эти знания могут быть как явными (осознанными), так и неявными. Осознанные знания характеризуются тем, что эксперт способен вербально их выразить. В отличие от этого неосознанные знания не поддаются формулированию в явной форме и проявляются в ходе практической деятельности в виде интуитивных способностей и предсказания реакций системы на определённые действия оператора.

Совокупность осознанных и неосознанных знаний, накапливаемых в мышлении эксперта, может быть представлена в виде ментальной или вербальной модели. Вербальная модель содержит множество правил, описывающих взаимосвязи между входными и выходными параметрами системы, а также лингвистические значения, используемые экспертом. Однако она является менее содержательной, чем ментальная модель, поскольку не включает неявную, интуитивную часть знаний специалиста, то есть ту информацию, которую он не в состоянии явно представить [Mus20, Mus21].

При этом эксперт, как правило, не способен полностью передать особенности своего рассуждения – в частности, не может точно определить форму функций принадлежности, используемых для описания лингвистических переменных, или тип логических операций, применяемых в процессе обработки информации. Необходимая для построения нечёткой лингвистической модели информация должна быть получена на основе предположений и интуиции эксперта, участвующего в построении модели.

Учитывая вышеизложенное, можно сделать вывод, что точность модели, построенной на основе экспертных знаний, определяется следующими факторами:

- полнотой и глубиной знаний эксперта о реальной системе;
- способностью эксперта формулировать эти знания в виде правил и лингвистических переменных;
- опытом, интуицией и компетенцией специалиста в области нечёткого моделирования, включающего использование соответствующих элементов аппарата нечёткой логики.

Нечёткий вывод занимает центральное место в нечёткой логике и системах нечёткого управления. Процесс нечёткого вывода представляет собой алгоритм получения нечётких заключений на основе заданных предпосылок с применением понятий нечёткой логики. Он объединяет основные концепции теории нечётких множеств: функции принадлежности, лингвистические переменные, нечёткие логические операции, а также методы нечёткой импликации и композиции. Системы нечёткого вывода являются частным случаем производственных нечётких систем, в которых условия и заключения отдельных правил формулируются в виде нечётких высказываний относительно значений лингвистических переменных [Ahm17].

Построение нечёткой модели на основе экспертных знаний и практического опыта выявило ряд трудностей, присущих данному подходу. К ним относятся:

- сложность точного определения параметров нечётких множеств, используемых экспертом;
- трудности или невозможность сбора информации о методах эксплуатации и управления для систем с большим числом входных параметров, быстро изменяющихся процессов или систем со сложными взаимосвязями между входами и выходами.

Эти обстоятельства обуславливают необходимость проведения исследований и разработки нечётких самонастраивающихся моделей, способных адаптироваться к изменениям параметров и условий функционирования системы.

При построении нечётких производственных систем используются высказывания следующего вида: высказывание « $b$  есть  $a$ », где  $b$  – наименование лингвистической переменной;  $a$  – значение данной лингвистической переменной, которому соответствует отдельный лингвистический терм из базового терм-множества переменной  $b$ .

В общем случае производственные нечёткие системы, или системы нечётких правил продукции, записываются в виде выражения следующего вида [Бор12]:

$$(i): Q; P; A \Rightarrow B, S, F, N,$$

где  $i$  – имя нечёткой продукции;  $Q$  – область (сфера) применения нечёткой продукции;  $P$  – условие применимости ядра нечёткой продукции;  $A \Rightarrow B$  – ядро нечёткой продукции, где  $A$  – условие ядра (антecedент);  $B$  – заключение ядра (консеквент);  $\Rightarrow$  – знак логической секвенции (следования);  $S$  – метод или способ определения количественного значения степени истинности заключения ядра;  $F$  – коэффициент определённости (уверенности) нечёткой продукции;  $N$  – постусловия продукции [Cap07].

На основе представленного вида нечётких лингвистических высказываний база правил нечётких продукции может быть записана в следующей форме:

ПРАВИЛО <#>: ЕСЛИ « $b_1$  есть  $a$ » И « $b_2$  есть  $a$ » ТО « $b_3$  есть  $c$ »,

здесь нечёткие высказывания « $b_1$  есть  $a$ » и « $b_2$  есть  $a$ » представляют собой условия нечётких продукции, а нечёткое высказывание « $b_3$  есть  $c$ » является заключением правила.

Для формирования базы правил нечёткого вывода определяются следующие лингвистические переменные:

- Входная лингвистическая переменная L1 – «Угол движения руки промышленного робота 2 (ПР2) по направлению к входному накопителю 2 (ВН2)». В качестве терм-множества для этой переменной используется множество

$$TL_1 = \{\text{минимальное, среднее, максимальное}\}.$$

- Входная лингвистическая переменная L2 – «Угол движения руки промышленного робота 3 (ПР3) по направлению к входному накопителю 1 (ВН1)». В качестве терм-множества для этой переменной используется множество

$$TL_2 = \{\text{минимальное, среднее, максимальное}\}.$$

- Выходная лингвистическая переменная L3 – «Степень свободы руки промышленного робота 1 (ПР1)». В качестве терм-множества для этой переменной используется множество

$$TL_3 = \{\text{минимальный, левый отрицательный максимум, левый положительный максимум, левый положительный минимум, правый положительный максимум, правый отрицательный максимум, правый положительный минимум, средний, максимальный}\}.$$

База правил системы нечеткого вывода выглядит следующим образом [Mus20]:

**Правило 1:** Если угол движения руки ПР2 по направлению к ВН2 минимальный, И угол движения руки ПР3 по направлению к ВН1 минимальный, ТО степень свободы руки ПР1 максимальная.

**Правило 2:** Если угол движения руки ПР2 по направлению к ВН2 минимальный, И угол движения руки ПР3 по направлению к ВН1 средний, ТО степень свободы руки ПР1 влево отрицательная максимальная.

**Правило 3:** Если угол движения руки ПР2 по направлению к ВН2 минимальный, И угол движения руки ПР3 по направлению к ВН1 максимальный, ТО степень свободы руки ПР1 влево положительная максимальная.

**Правило 4:** Если угол движения руки ПР2 по направлению к ВН2 средний, И угол движения руки ПР3 по направлению к ВН1 минимальный, ТО степень свободы руки ПР1 вправо отрицательная максимальная.

**Правило 5:** Если угол движения руки ПР2 по направлению к ВН2 средний, И угол движения руки ПР3 по направлению к ВН1 средний, ТО степень свободы руки ПР1 средняя.

**Правило 6:** Если угол движения руки ПР2 по направлению к ВН2 средний, И угол движения руки ПР3 по направлению к ВН1 максимальный, ТО степень свободы руки ПР1 влево положительная минимальная.

**Правило 7:** Если угол движения руки ПР2 по направлению к ВН2 максимальный, И угол движения руки ПР3 по направлению к ВН1 минимальный, ТО степень свободы руки ПР1 вправо положительная максимальная.

**Правило 8:** Если угол движения руки ПР2 по направлению к ВН2 максимальный, И угол движения руки ПР3 по направлению к ВН1 средний, ТО степень свободы руки ПР1 вправо положительная минимальная.

**Правило 9:** Если угол движения руки ПР2 по направлению к ВН2 максимальный, И угол движения руки ПР3 по направлению к ВН1 максимальный, ТО степень свободы руки ПР1 минимальная.

### ФАЗИФИКАЦИЯ БАЗЫ НЕЧЕТКИХ ПРОДУКЦИОННЫХ ПРАВИЛ

Для фазификации входных и выходных лингвистических переменных в базе правил нечетких продукций выбрана треугольная функция принадлежности.

Треугольным нечетким числом (ТНЧ) называют нормальное нечеткое число, функция принадлежности которого может быть задана треугольной функцией  $f_\Delta$ :

$$f_\Delta(x; a, \alpha, \beta) = \begin{cases} 0, & x \leq \alpha, \\ \frac{x - \alpha}{\alpha - \alpha}, & \alpha \leq x \leq a, \\ \frac{\beta - x}{\beta - \beta}, & a \leq x \leq \beta, \\ 0, & \beta \leq x. \end{cases}$$

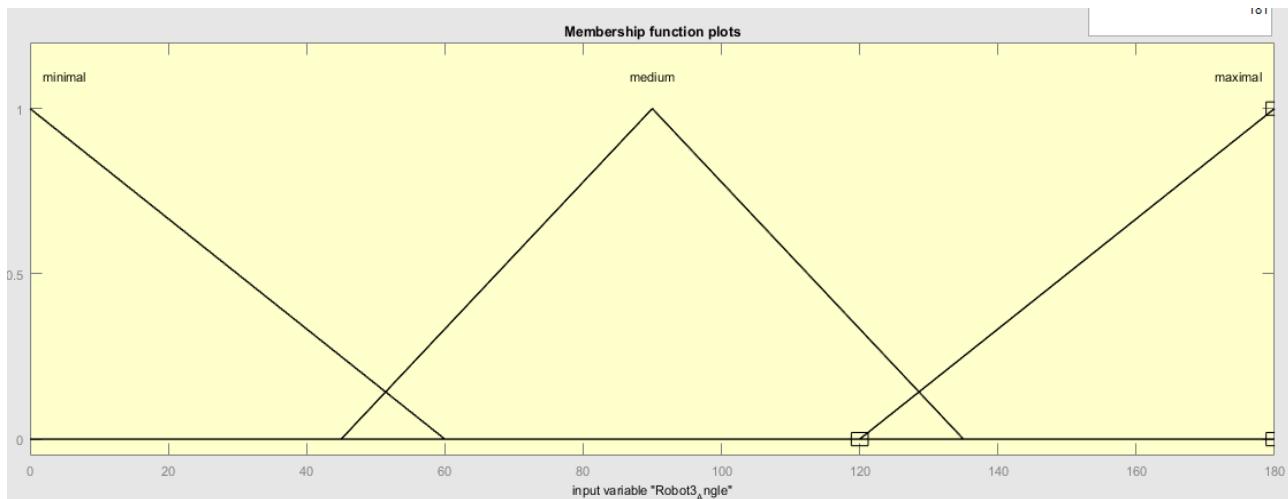
Параметры  $a, \alpha, \beta$  принимают произвольные действительные значения и удовлетворяют условию  $\alpha \leq a \leq \beta$ . В этом случае ТНЧ представляют в виде кортежа из трех чисел

$$A = \langle a, \alpha, \beta \rangle,$$

где  $a$  – модальное значение ТНЧ;  $\alpha$  и  $\beta$  – левый и правый коэффициенты нечеткости ТНЧ.

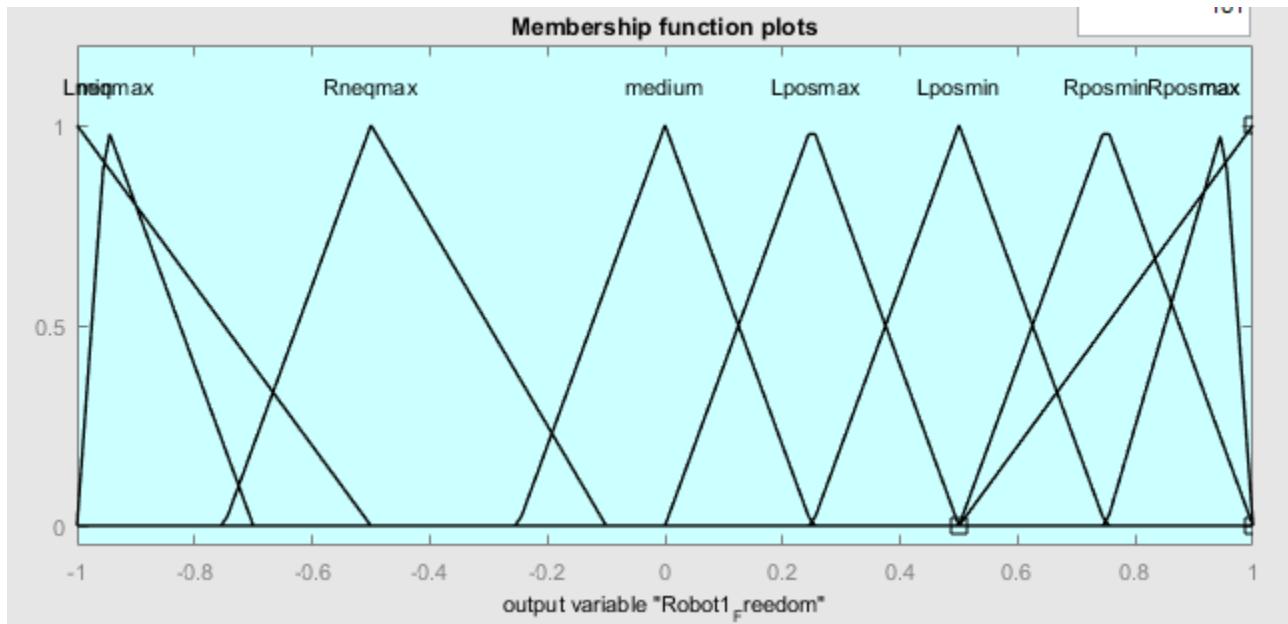
Для фазификации термов лингвистической переменной  $L_1$  выбраны треугольные функции принадлежности (рис. 1) в универсуме  $U_1 = [0, 180]$ . Определены следующие нечеткие множества:  $\widetilde{L_1}_1 = [0, 0, 60]$  – минимальное;  $\widetilde{L_1}_2 = [45, 90, 135]$  – среднее;  $\widetilde{L_1}_3 = [120, 180, 180]$  – максимальное.

Аналогично, для фазификации термов лингвистической переменной  $L_2$  выбраны треугольные функции принадлежности в универсуме  $U_2 = [0, 180]$ . Определены следующие нечеткие множества:  $\widetilde{L_2}_1 = [0, 0, 60]$  – минимальное;  $\widetilde{L_2}_2 = [45, 90, 135]$  – среднее;  $\widetilde{L_2}_3 = [120, 180, 180]$  – максимальное.



**Рис. 1** Графики функций принадлежности термов лингвистической переменной «Угол движения руки промышленного робота 2 по направлению к входному накопителю 2»

Для фазификации термов лингвистической переменной  $L_3$  выбраны треугольные функции принадлежности (рис. 2) в универсуме  $U_3 = [-1, 1]$  и определены следующие нечёткие множества:  $\widetilde{L_3}_1 = [-1, -1, -0.6]$  – минимум;  $\widetilde{L_3}_2 = [-1.0, -0.95, -0.7]$  – левый отрицательный максимум;  $\widetilde{L_3}_3 = [-0.75, -0.5, -0.1]$  – правый отрицательный максимум;  $\widetilde{L_3}_4 = [-0.25, 0, 0.25]$  – средний;  $\widetilde{L_3}_5 = [0, 0.25, 0.5]$  – левый положительный максимум;  $\widetilde{L_3}_6 = [0.25, 0.5, 0.75]$  – левый положительный минимум;  $\widetilde{L_3}_7 = [0.5, 0.75, 1]$  – правый положительный минимум;  $\widetilde{L_3}_8 = [0.75, 0.95, 1.0]$  – правый положительный максимум;  $\widetilde{L_3}_9 = [0.6, 1.0, 1.0]$  – максимум.



**Рис. 2** Графики функций принадлежности термов лингвистической переменной «Степень свободы руки промышленного робота 1»

### НЕЧЁТКИЙ ВЫВОД ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНО ФУНКЦИОНИРУЮЩИМИ ПРОМЫШЛЕННЫМИ РОБОТАМИ

Нечеткие множества, соответствующие элементам терм-множества лингвистической переменной  $L_1$ , можно представить в виде:

$$\mu_{L\bar{1}_1}(x) = \{ (1/0), (0,91/5), (0,83/10), (0,75/15), (0,66/20), (0,58/25), (0,6/30), (0,53/35), (0,46/40), (0,4/45) \}, (0,33/50), (0,26/55), (0,2/60) \};$$

$$\mu_{L\bar{1}_2}(x) = \{ (0/50), (0,18/57), (0,25/60), (0,38/65), (0,48/69), (0,63/75), (0,75/80), (1/90), (0,9/94), (0,5/99), (1/105), (0,63/105), (0,33/117), (0,13/125), (0/130) \};$$

$$\mu_{L\bar{1}_3}(x) = \{ (0/120), (0,08/125), (0,17/130), (0,28/137), (0,42/145), (0,58/155), (0,7/162), (0,83/170), (0,92/175), (0/180) \}.$$

Нечеткие множества, соответствующие элементам терм-множества лингвистической переменной L2, можно представить в виде:

$$\mu_{L\bar{2}_1}(x) = \{ (1/0), (0,91/5), (0,83/10), (0,75/15), (0,66/20), (0,58/25), (0,6/30), (0,53/35), (0,46/40), (0,4/45) \}, (0,33/50), (0,26/55), (0,2/60) \};$$

$$\mu_{L\bar{2}_2}(x) = \{ (0/50), (0,18/57), (0,25/60), (0,38/65), (0,48/69), (0,63/75), (0,75/80), (1/90), (0,9/94), (0,5/99), (1/105), (0,63/105), (0,33/117), (0,13/125), (0/130) \};$$

$$\mu_{L\bar{2}_3}(x) = \{ (0/120), (0,08/125), (0,17/130), (0,28/137), (0,42/145), (0,58/155), (0,7/162), (0,83/170), (0,92/175), (0/180) \}.$$

Нечеткие множества, соответствующие элементам терм-множества лингвистической переменной L3, можно представить в виде:

$$\mu_{L\bar{3}_1}(x) = \{ (1/-1), (0,875/-0,95), (0,75/-0,9), (0,5/-0,8), (0,25/-0,7), (0,125/-0,65), (0/-0,6) \};$$

$$\mu_{L\bar{3}_2}(x) = \{ (0/-1), (1/-0,95), (0,8/-0,9), (0,6/-0,85), (0,4/-0,8), (0,2/-0,75), (0/-0,7) \};$$

$$\mu_{L\bar{3}_3}(x) = \{ (0/-0,75), (0,2/-0,7), (0,6/-0,6), (1/-0,5), (0,75/-0,4), (0,5/-0,3), (0,25/-0,2), (0/-0,1) \};$$

$$\mu_{L\bar{3}_4}(x) = \{ (0/-0,25), (0,2/-0,2), (0,6/-0,1), (0/0), (0,6/0,1), (0,2/0,2), (0/0,25) \};$$

$$\mu_{L\bar{3}_5}(x) = \{ (0/0), (0,4/0,1), (0,8/0,2), (1/0,25), (0,8/0,3), (0,4/0,4), (0/0,5) \};$$

$$\mu_{L\bar{3}_6}(x) = \{ (0/0,25), (0,2/0,3), (0,6/0,4), (1/0,5), (0,6/0,6), (0,2/0,7), (0/0,75) \};$$

$$\mu_{L\bar{3}_7}(x) = \{ (0/0,5), (0,4/0,6), (0,8/0,7), (1/0,75), (0,8/0,8), (0,4/0,9), (0/1) \};$$

$$\mu_{L\bar{3}_8}(x) = \{ (0/0,75), (0,25/0,8), (0,75/0,9), (1/0,95), (0/1) \};$$

$$\mu_{L\bar{3}_9}(x) = \{ (0/0,6), (0,25/0,7), (0,5/0,8), (0,75/0,9), (0,87/0,95), (1/1) \}.$$

Этапом фазификации является установление соответствия конкретным численным значением отдельной входной переменной системы нечеткого вывода и значением функции принадлежности соответствующего ей терма входной лингвистической переменной. После завершения фазификации для всех входных переменных определяются конкретные значения функций принадлежности для каждого из термов, включённых в подусловия базы правил системы нечёткого вывода [Mus24].

С использованием алгоритма Мамдани вычисляются конкретные значения функций принадлежности для каждой входной лингвистической переменной.

Вычисляются все значения функций принадлежности  $\mu_{L\bar{1}_k}(x)$  и  $\mu_{L\bar{2}_k}(y)$ ,  $k = 1..9$  для термов лингвистических переменных в подусловиях базы правил с учетом значения  $x = 55$  и  $y = 127$ , что приводит к следующим значениям:

$$\mu_{L\bar{1}_1}(x) = 0,083; \quad \mu_{L\bar{1}_2}(x) = 0,22; \quad \mu_{L\bar{1}_3}(x) = 0; \quad \mu_{L\bar{2}_1}(x) = 0; \quad \mu_{L\bar{2}_2}(x) = 0,177; \quad \mu_{A\bar{L}\bar{2}_3}(x) = 0,116.$$

Агрегирование условий по каждому из правил системы нечеткого вывода выполняется с применением нечеткой импликации. Степени истинности условий для каждого правила продукции представлены в табл. 1.

Таблица 1  
Результаты этапа агрегирования

Продукции	Степень истинности подусловия переменной L1	Степень истинности подусловия переменной L2	Степень истинности условий по каждому из правил
1	0.083	0	0
2	0.083	0	0
3	0.083	0	0
4	0.22	0.177	0.177
5	0.22	0.177	0.177
6	0.22	0.177	0.177
7	0	0.116	0
8	0	0.116	0
9	0	0.116	0

Процедура активации представляет собой процесс определения степени истинности  $q_i$  ( $i = 1, \dots, 9$ ) каждого из подзаключений правил нечётких продукции. Для этого выполняется алгебраическое умножение степени истинности подзаключений на весовой коэффициент соответствующего правила. Весовые коэффициенты  $F_i$  для всех правил принимаются равными единице. Результаты активации представлены в табл. 2.

Таблица 2  
Степени истинности подзаключений продукции

Продукции	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Степень истинности подзаключений	0	0	0	0.177	0.177	0.177	0	0	0

После определения множества  $q_i$  ( $i = 1, \dots, 9$ ) функции принадлежности каждого из подзаключений продукции правил  $p_i$  вычисляются с использованием метода нечёткой композиции:

$$\mu(p_i) = \min\{q_i, \mu_{L3}(x_i)\}, \quad i = 1, \dots, 9,$$

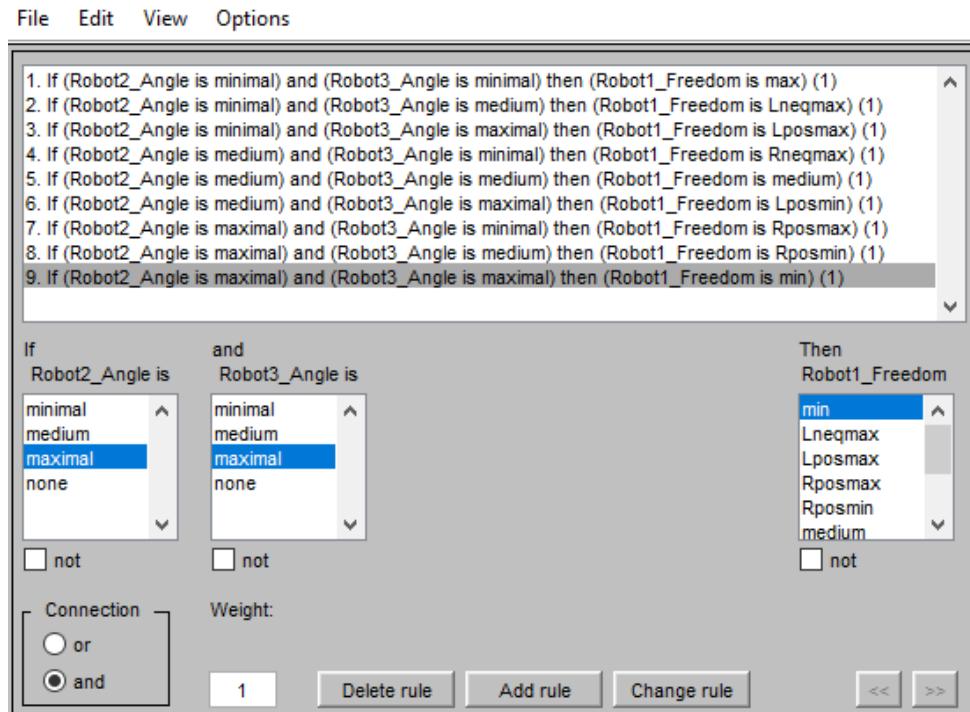
где  $\mu_{L3}(x_i)$  – функция принадлежности термов выходной лингвистической переменной, а  $q_i$  – степень истинности подзаключений правила нечёткой продукции  $p_i$ :

$$\begin{aligned} \mu(p_1) &= \min\{q_1, \mu_{L3_9}(0.9)\} = \min\{0; 0.75\} = 0; \\ \mu(p_2) &= \min\{q_2, \mu_{L3_2}(-0.7)\} = \min\{0; 0\} = 0; \\ \mu(p_3) &= \min\{q_2, \mu_{L3_5}(0.3)\} = \min\{0; 0.8\} = 0; \\ \mu(p_4) &= \min\{q_2, \mu_{L3_3}(-0.5)\} = \min\{0.177; 1\} = 0.177; \\ \mu(p_5) &= \min\{q_2, \mu_{L3_4}(0.21)\} = \min\{0.177; 0.16\} = 0.16; \\ \mu(p_6) &= \min\{q_2, \mu_{L3_6}(0.4)\} = \min\{0.177; 0.6\} = 0.177; \\ \mu(p_7) &= \min\{q_2, \mu_{L3_8}(0.8)\} = \min\{0; 0.25\} = 0; \\ \mu(p_8) &= \min\{q_2, \mu_{L3_7}(1)\} = \min\{0; 0\} = 0; \\ \mu(p_9) &= \min\{q_2, \mu_{L3_1}(-0.8)\} = \min\{0; 0.5\} = 0; \end{aligned}$$

Дефазификация – это процесс перехода от функции принадлежности выходной лингвистической переменной к ее количественному значению. Дефазификации выходной лингвистической переменной «**Степень свободы руки промышленного робота 1**» с применением метода центра тяжести приводит к следующему значению:

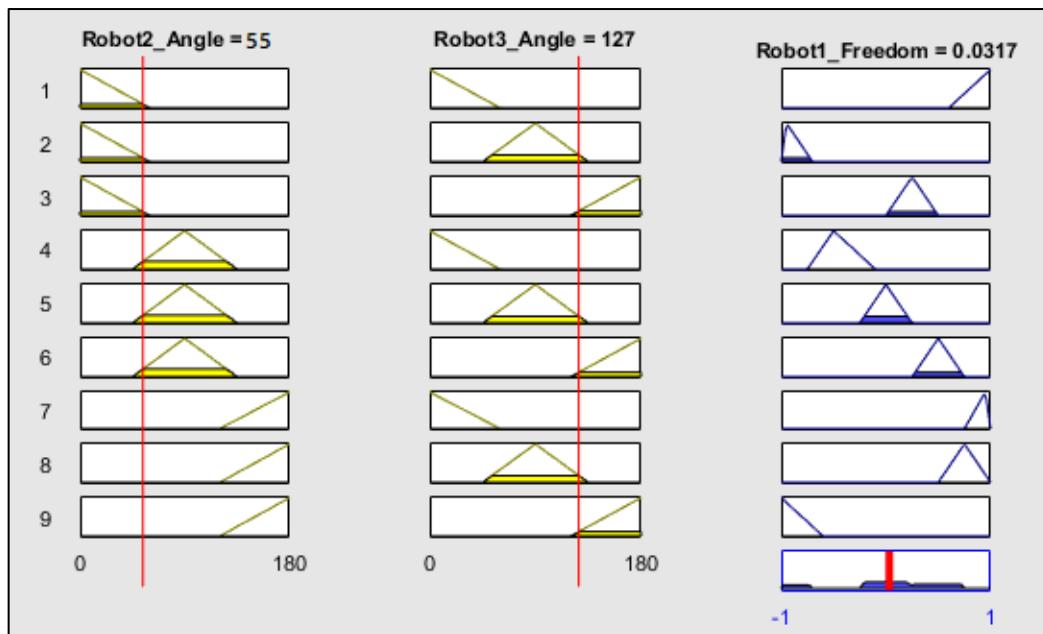
$$x = \frac{-0.5 \times 0.177 + 0.21 \times 0.16 + 0.4 \times 0.177}{0.177 + 0.16 + 0.177} = 0.031.$$

Разработана нечёткая модель для управления степенью свободы руки промышленного робота 1 в графической среде MATLAB. Сформулированные правила для разрабатываемой системы, созданные с использованием редактора правил MATLAB, представлены на рис. 3.



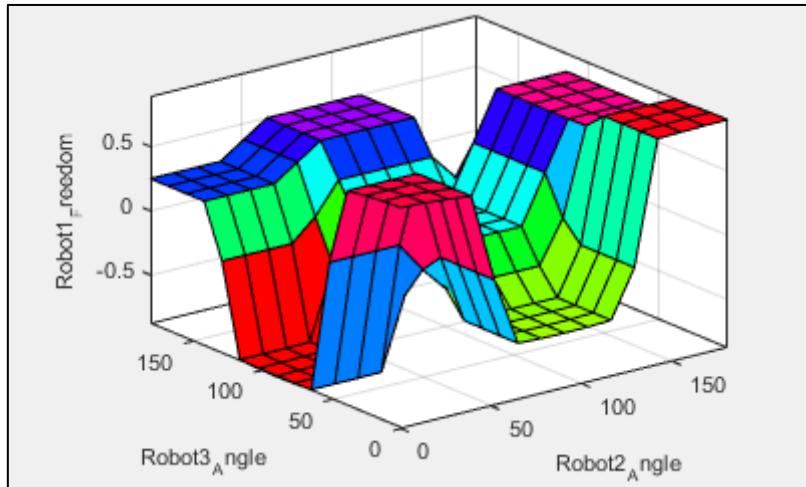
**Рис. 3** Графический интерфейс редактора правил системы нечеткого вывода «Степень свободы руки промышленного робота 1»

Для оценки построенной системы нечёткого вывода были введены значения  $[x, y] = [55, 127]$ . В результате получено значение выходной переменной «Степень свободы руки промышленного робота 1», равное 0.0317 (рис. 4), что подтверждает адекватность модели.



**Рис. 4** Графический интерфейс программы просмотра правил системы для входных значений  $[55, 127]$ .

Для общего анализа разработанной системы нечёткого вывода «Степень свободы руки промышленного робота 1» выполнена визуализация поверхности нечёткого вывода (рис. 5). Это позволяет установить зависимость между входными и выходными переменными системы.



**Рис. 5** Визуализация поверхности нечёткого вывода «Степень свободы руки промышленного робота 1»

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана модель принятия решений для управления параллельно функционирующими мехатронными устройствами. Создана база нечётких производственных правил для управления параллельно функционирующими промышленными роботами. Определены входные и выходные лингвистические переменные, их терм-множества. В качестве функции принадлежности выбраны треугольные нечёткие числа, реализована процедура фаззификации входных и выходных переменных. С применением алгоритма Мамдани определены конкретные значения функций принадлежности входных лингвистических переменных. Проведена визуализация поверхности нечёткого вывода, что позволило установить зависимость между входными и выходными переменными.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

- [Ahm17] Ahmedov M. A., Mustfayev V. A., Atayev G. N., Rahimov Sh. R. Simulation of Dynamical Enterprises Process with Application of the Modification Fuzzy Net Petri // Advances in Intelligent Systems and Computing: 2017. Vol. 502. Pp. 913–921. DOI: [10.1007/978-981-10-1837-4\\_76](https://doi.org/10.1007/978-981-10-1837-4_76). EDN: XNOJVJ.
- [Anj12] Anjaneyulu S. S. S. R., Rajasekaran K. S. Design and implementation of fuzzy control for industrial robot // International Journal of Computer Applications. 2012. Vol. 47, No. 17. P. 1–5. DOI: [10.5120/7444-0107](https://doi.org/10.5120/7444-0107).
- [Mai22] Mai The Vu, Khalid A. Alattas et al. Optimized fuzzy enhanced robust control design for a Stewart parallel robot // Mathematics. 2022. 10 (11). 1917. DOI: [10.3390/math10111917](https://doi.org/10.3390/math10111917). EDN: VWAWRS.
- [Mus20] Mustafayev V. A., Salmanova M. N. Decision making model for controls of complex parallel functioning distributed systems // The 7<sup>th</sup> International Conference on Control and Optimization with Industrial Applications (COIA 2020). Baku, 26–28 August, 2020. Vol. I. P. 293–295.
- [Mus21] Mustafayev V. A., Zeynalabdiyeva I. S., Kravets O. Ja. Control model of parallel functioning production modules as fuzzy Petri nets // Journal of Physics: Conference Series. JRC. 2021. Pp. 1074–1079. DOI: [10.1088/1742-6596/2094/2/022003](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2094/2/022003). EDN: FZRFNV.
- [Mus24] 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](https://doi.org/10.1109/CoDIT62066.2024.10708297).
- [Pha25] Phan B. K. Application of fuzzy logic in the robot control for mechanical processing // ResearchGate. 2025. DOI: [10.15625/2525-2518/18069](https://doi.org/10.15625/2525-2518/18069).
- [Бор12] Борисов В. В., Круглов В. В., Федулов Ф. С. Нечеткие модели и сети. М.: Телеком, 2012. 725 с. EDN: RBAWZT. [[Borisov V. V., Kruglov V. V., Fedolov F. S. Fuzzy models and networks. Moscow: Telecom, 2012. (In Russian).]]
- [Мир24] Миронов К. В. Transport-by-Throwing – робототехнический способ перемещения предметов перебросом: обсуждение научно-технической задачи // СИИТ. 2024. Т. 6, № 1 (16). С. 43–58. DOI: [10.54708/2658-5014-SIIT-2024-no1-p43](https://doi.org/10.54708/2658-5014-SIIT-2024-no1-p43).

- EDN: [QGFZBW](#). [[Mironov K. V. Transport-by-Throwing - a robotic method of moving objects by throwing: discussion of the scientific and technical problem // SIIT. 2024. Vol. 6, No. 1(16). P. 43-58. (In Russian).]]
- [Орп24] Оруджева Г. Э. Моделирование выбора и проектирования мобильного промышленного робота для ГПС // СИИТ. 2024. Т. 6, № 4(19). С. 91–97. DOI: [10.54708/2658-5014-SIIT-2024-но4-p91](#). EDN: [POUZF](#). [[Orudzheva G. E. Modeling the selection and design of a mobile industrial robot for GPS // SIIT. 2024. Vol. 6, No. 4(19). P. 91-97. (In Russian).]]
- [Пет21] Петренко В. И., Тебуева Ф. Б., Гурчинский М. М. и др. Алгоритм машинного обучения системы управления антропоморфными манипуляторами // СИИТ. 2021. Т. 3, № 2 (6). С. 35–43. DOI: [10.54708/26585014\\_2021\\_32635](#). EDN: [USZJSM](#). [[Petrenko V. I., Tebueva F. B., Gurchinsky M. M., et al. Machine learning algorithm for a control system for anthropomorphic manipulators // SIIT. 2021. Vol. 3, No. 2(6). P. 35-43. (In Russian).]]
- [Cap07] Сараев П. В. Нейросетевые методы искусственного интеллекта: Уч. пос. Липецк: ЛГТУ, 2007. 64 с. EDN: [QMSBKR](#). [[Saraev P. V. Neural network methods of artificial intelligence: a tutorial. Lipetsk: LGTU, 2007. (In Russian)]]

## ОБ АВТОРАХ | ABOUT THE AUTHORS

### САЛМАНОВА Малахат Насиман

Сумгайтский государственный университет, Азербайджан.  
Канд. техн. наук, ст. преп. кафедры технологии преподавания  
математики и информатики.  
[malaxat\\_70@mail.ru](mailto:malaxat_70@mail.ru). ORCID: [0000-0003-1274-9900](#)

### АЛИЕВА Кёнуль Ризван

Сумгайтский государственный университет, Азербайджан.  
Преп. кафедры технологии преподавания математики и информатики.  
[konul.aliyeva1@sdu.edu.az](mailto:konul.aliyeva1@sdu.edu.az). ORCID: [0000-0003-3569-3241](#)

### РУФУЛЛАЕВА Рена Агабала

Сумгайтский государственный университет, Азербайджан.  
Диссертант кафедры информационных технологий.  
[rrufullayeva@list.ru](mailto:rrufullayeva@list.ru).

### SALMANOVA Malahat Nasiman

Sumgait State University, Azerbaijan.  
PhD in Technical Sciences, Senior Lecturer at the Department of Mathematics and Computer Science Teaching Technologies.  
[malaxat\\_70@mail.ru](mailto:malaxat_70@mail.ru). ORCID: [0000-0003-1274-9900](#)

### ALIEVA Konul Rizvan

Sumgait State University, Azerbaijan.  
Lecturer at the Department of Mathematics and Informatics Teaching Technologies.  
[konul.aliyeva1@sdu.edu.az](mailto:konul.aliyeva1@sdu.edu.az). ORCID: [0000-0003-3569-3241](#)

### RUFULLAEVA Rena Agabala

Sumgait State University, Azerbaijan.  
PhD candidate at the Department of Information Technology.  
[rurufullayeva@list.ru](mailto:rurufullayeva@list.ru).

## МЕТАДАННЫЕ | METADATA

**Заглавие:** Модель принятия решений для управления параллельно функционирующими мехатронными устройствами.

**Авторы:** Салманова М. Н., Алиева К. Р., Руфуллаева Р. А.

**Аннотация:** В представленной работе рассматривается разработка модели принятия решений для управления параллельно функционирующими мехатронным устройством (промышленным роботом). Создана база нечётких производственных правил, определены входные и выходные лингвистические переменные и реализована процедура фазификации. С применением алгоритма Мамдани вычислены конкретные значения функций принадлежности входных и выходных переменных. В результате визуализации поверхности нечёткого вывода установлена зависимость между входными и выходными лингвистическими переменными.

**Ключевые слова:** Управление; промышленный робот; производственные правила; фазификация; нечёткий вывод.

**Язык:** Русский.

Статья поступила в редакцию 11 сентября 2025 г.

## METADATA

**Title:** A decision-making model for controlling parallel-operating mechatronic devices.

**Authors:** Salmanova M. N., Alieva K. R., Rufullaeva R. A.

**Abstract:** This paper examines the development of a decision-making model for controlling a parallel-operating mechatronic device (industrial robot). A fuzzy production rule base was created, input and output linguistic variables were defined, and a fuzzification procedure was implemented. Using the Mamdani algorithm, specific values of the membership functions of the input and output variables were calculated. Visualization of the fuzzy inference surface established the relationship between the input and output linguistic variables.

**Key words:** Control, industrial robot, production rules, fuzzification, fuzzy inference.

**Language:** Russian.

The article was received by the editors on 11 September 2025.