

Интеллектуальные системы управления, анализ данных

© 2025 г. А.Ф. АНТИПИН, канд. техн. наук (andrejantipin@ya.ru)
(Стерлитамакский филиал Уфимского университета науки и технологий),
Е.В. АНТИПИНА, канд. физ.-мат. наук (stepashinaev@ya.ru),
С.А. МУСТАФИНА, д-р физ.-мат. наук (mustafina_sa@mail.ru)
(Уфимский университет науки и технологий)

МОДИФИКАЦИЯ МНОГОМЕРНОГО НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА С ЛОКАЛЬНЫМ ТЕРМ-ДЕЛЕНИЕМ ВХОДНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ¹

Рассматривается модификация многомерного нечеткого регулятора с взаимосвязанными регулируемыми параметрами. Приводятся описание блок-схемы регулятора и выражения для расчета основных параметров. Описывается механизм перехода от общего терм-деления входных переменных к их локальному терм-делению относительно выходных переменных. Рассматривается разработанное авторами специальное программное обеспечение для визуальной разработки нечеткого регулятора, гибкой настройки термов, оценки и анализа системы продукционных правил. Теоретические результаты иллюстрируются примерами.

Ключевые слова: многомерный нечеткий регулятор, система продукционных правил, модификация, программное обеспечение, терм-деление.

DOI: 10.31857/S0005231025070053, **EDN:** JRZPLT

1. Введение

В настоящее время нечеткие регуляторы и их модификации, в том числе гибридные, все чаще находят свое применение при разработке автоматизированных систем управления (АСУ). Они обладают более гибкими настройками по сравнению с традиционными ПИД-регуляторами, что особенно актуально для многомерных и многосвязных систем со сложной математической моделью или отсутствием математической модели как таковой. С использованием нечеткой логики строятся экспертные и интеллектуальные системы управления [1–7].

Проблемам практической реализации нечетких регуляторов посвящен ряд работ отечественных и зарубежных авторов, в которых следует отметить [8–14]:

1) высокую сложность алгоритмов (в том числе фаззификации и дефаззификации) нечеткого регулирования;

¹ Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (код научной темы FZWU-2023-0002).

- 2) неоднозначность выбора функции принадлежности непрерывных величин;
- 3) значительный, а в отдельных случаях многократный рост числа производционных правил при увеличении количества входных переменных;
- 4) отсутствие гибкости при реализации отличных от общепринятых подходов, связанных с нечеткими регуляторами, и др.

Кроме того, для синтеза и программной реализации нечетких регуляторов часто используется стороннее, по отношению к программируемым логическим контроллерам (ПЛК), программное обеспечение, в частности MATLAB [15–17], что ведет к дополнительным затратам времени и средств, а также затрудняет внесение изменений в процессе эксплуатации АСУ.

Для решения перечисленных выше проблем необходимо совершенствование характеристик нечетких регуляторов и алгоритмов их работы; появление новых модификаций, связанных с формированием системы производционных правил; разработка специального программного обеспечения с генерацией программных блоков нечетких регуляторов для современных сред разработки программ для ПЛК.

Целью работы является разработка новой модификации многомерного нечеткого регулятора, ориентированной на устранение описанных выше недостатков и проблем, и программного обеспечения для настройки параметров и системы производционных правил.

2. Описание модификации нечеткого регулятора

Рассмотрим разработанную авторами модификацию нечеткого регулятора, предназначенную для использования в АСУ с большим объемом производционных правил, описывающих логику работы сложного технологического объекта при отсутствии адекватной математической модели. Цель модификации – решение проблем, связанных с составлением системы производционных правил (СПП), устранение избыточности правил и снижение их максимального числа. Это достигается путем определения взаимосвязей переменных, а также перехода от общего к локальному терм-делению входных переменных.

На рис. 1 представлена блок-схема модификации многомерного нечеткого регулятора со взаимосвязанными регулируемыми параметрами, где Φ_1, \dots, Φ_n – фаззификаторы входных переменных x ; $\mathcal{D}_1, \dots, \mathcal{D}_m$ – дефаззификаторы выходных переменных y ; БФ и БД – блоки фаззификации и дефаззификации, управляющие работой фаззификаторов и дефаззификаторов; БЛВ – блок логического вывода регулятора с блоком производционных правил БПП; T_t – термы переменных, которыми оперирует БЛВ в момент времени t ; БПр – блок предсказания термов входных переменных x ; БРФ – блоки расширения функций регулятора, в том числе для связи и обмена данными с внешними устройствами.

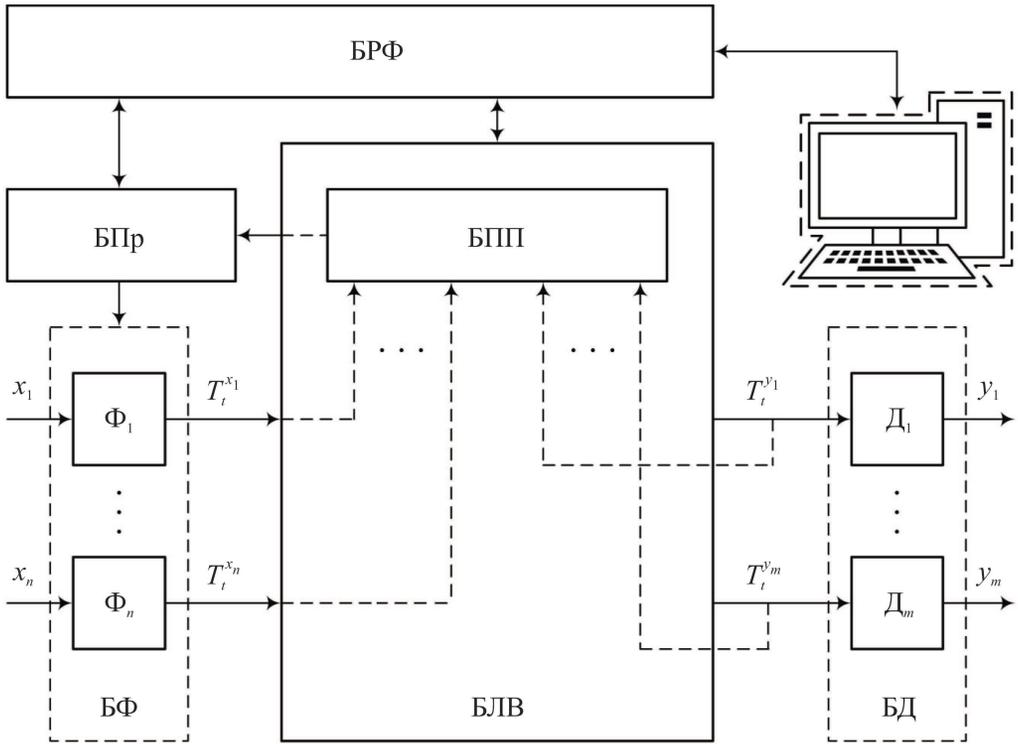


Рис. 1. Блок-схема модификации нечеткого регулятора.

Пусть терм-множество T^x непрерывной величины x имеет вид

$$T^x = \left\{ T_1^x \left(x_1^{(1)} \leq x_t < x_1^{(n)} \right), T_2^x \left(x_2^{(1)} \leq x_t < x_2^{(n)} \right), \dots, T_{k(x)}^x \left(x_{k(x)}^{(1)} \leq x_t \leq x_{k(x)}^{(n)} \right) \right\},$$

где $x^{(1)}, x^{(n)}$ – значения, которые определяют левую и правую границы интервалов термов T ; x_t – значение переменной x в момент времени t ; $k(x)$ – общее количество термов.

Для повышения иллюстративности был выбран трапецевидный (близкий к прямоугольному) тип функций принадлежности ч, для которого характерно отсутствие пересечения интервалов термов в границах общего терм-деления переменной.

Так как

$$x_k^{(1)} = x_{k-1}^{(n)}$$

по определению, то для описания $k(x) - 1$ термов T достаточно значения одной из границ интервалов. Границы первого или последнего терма описываются непосредственно двумя значениями. Например:

$$T^x = \left\{ T_1^x \left(x_1^{(1)} \right), T_2^x \left(x_2^{(1)} \right), \dots, T_{k(x)}^x \left(x_{k(x)}^{(1)} \leq x_t \leq x_{k(x)}^{(n)} \right) \right\}.$$

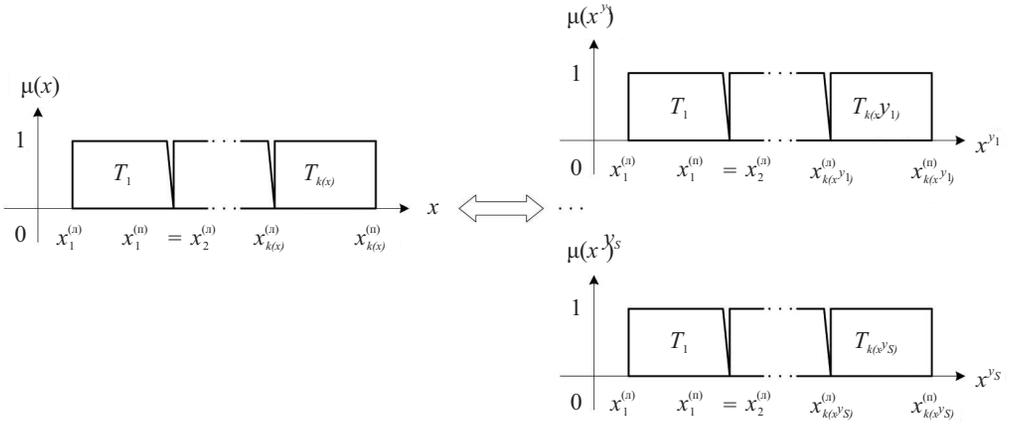


Рис. 2. Деление общего терм-множества на локальные терм-множества.

Известно, что максимальное количество продукционных правил R_{\max} регулятора зависит от суммарного числа термов входных переменных [18], т.е.

$$R_{\max} = \prod_{i=1}^n k(x_i),$$

где n – количество входных переменных регулятора.

При наличии выходных переменных с обратной связью (как показано на рис. 1) выражение для расчета R_{\max} примет вид

$$R_{\max} = \prod_{i=1}^n k(x_i) \prod_{j=1}^o k(y_j),$$

где o – количество выходных переменных регулятора с обратной связью.

Для многомерного нечеткого регулятора с t выходными переменными y общее терм-деление некоторых входных переменных x может оказаться избыточным для вычисления значений отдельных выходных переменных и приводит к ошибкам дефаззификации, связанным прежде всего с отсутствием продукционных правил, определенных техническим заданием.

Общее терм-деление может быть упрощено до локального терм-деления для конкретных переменных y . Так, локальное терм-множество T^{x^y} непрерывной величины x для взаимосвязанной переменной y аналитически можно представить следующим образом:

$$T^{x^y} = \left\{ T_1^{x^y} \left(x_1^{y(n)} \leq x_t < x_1^{y(n)} \right), \dots, T_{k(x^y)}^{x^y} \left(x_{k(x^y)}^{y(n)} \leq x_t \leq x_{k(x^y)}^{y(n)} \right) \right\},$$

при этом $k(x^y) \leq k(x)$.

Графически данный процесс можно представить в виде, показанном на рис. 2.

В этом случае выражение для расчета максимального количества продукционных правил R'_{\max} регулятора примет вид

$$R'_{\max} = \sum_{j=1}^m R_{\max}^{y_j} = \sum_{j=1}^m \prod_{i=1}^s k(x_i^{y_j}),$$

где R_{\max}^y – максимальное количество продукционных правил для конкретной выходной переменной y ; s – количество входных переменных x , связанных с выходной переменной y .

Для выполнения расчетов исходные данные по количеству термов входных переменных x для связанных с ними выходных переменных y удобно представить в виде табл. 1. При отсутствии взаимосвязи между переменными в соответствующую ячейку таблицы ставится символ «-».

Таблица 1. Данные для анализа терм-связей переменных

Выходная переменная	Количество термов входных переменных		
	x_1	...	x_n
y_1	$k(x_1^{y_1})$...	$k(x_n^{y_1})$
...
y_m	$k(x_1^{y_m})$...	$k(x_n^{y_m})$

При этом должно соблюдаться следующее условие по минимальному количеству термов выходных переменных:

$$k_{\min}(y) \leq R^y,$$

где R^y – количество продукционных правил для конкретной выходной переменной y .

При количестве продукционных правил R^y , меньшем суммарного числа термов y , некоторые термы останутся незадействованными, так как не участвуют в формировании системы продукционных правил. Такие термы следует удалить, объединив с соседними термами, чтобы не было разрывов внутри рабочих диапазонов значений выходных переменных. Если объединение термов невозможно, то такие переменные не могут в дальнейшем использоваться при реализации обратной связи во избежание ошибок фаззификации.

Подобный подход позволяет устранить так называемый конфликт локальных термов, вызванный наложением их интервалов при формировании общего терм-деления, как показано на рис. 3, что ведет к появлению новых термов и, как следствие, увеличению максимального числа продукционных правил регулятора.

Из рис. 3 видно, что для формирования общего терм-деления непрерывной величины x , которое имеет вид

$$T^x = \{T_1^x(0), T_2^x(20), T_3^x(40), T_4^x(60), T_5^x(80 \leq x_t \leq 100)\},$$

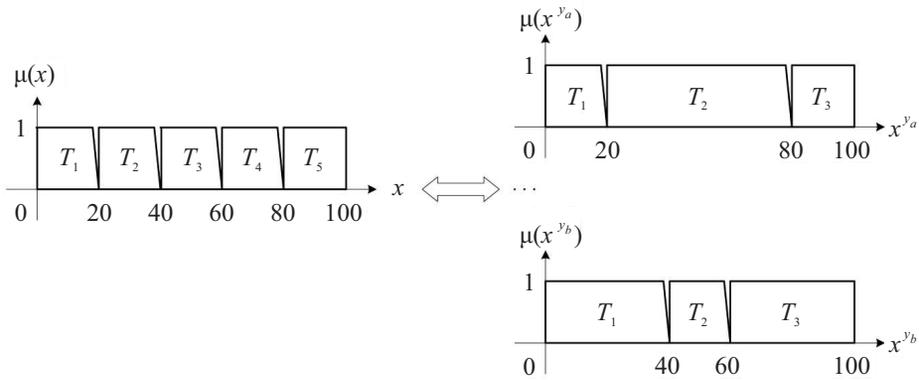


Рис. 3. Конфликт локальных термов при интерпретации переменных.

используются следующие локальные терм-деления x для выходных переменных y_a и y_b :

$$T^{x^{y_a}} = \{T_1^{x^{y_a}}(0), T_2^{x^{y_a}}(20), T_3^{x^{y_a}}(80 \leq x_t \leq 100)\},$$

$$T^{x^{y_b}} = \{T_1^{x^{y_b}}(0), T_2^{x^{y_b}}(40), T_3^{x^{y_b}}(60 \leq x_t \leq 100)\}.$$

Так, терм T_1^x соответствует терму $T_1^{x^{y_a}}$, терм T_3^x – терму $T_2^{x^{y_b}}$, а терм T_5^x – терму $T_3^{x^{y_a}}$. Термы T_2^x и T_4^x получены в результате объединения интервалов оставшихся термов из локальных терм-делений непрерывной величины x для выходных переменных y_a и y_b .

Как видно из примера, общее терм-деление непрерывной величины x приводит к появлению следующих проблем. Термы T_1^x и T_2^x , T_4^x и T_5^x дублируют продукционные правила для выходной переменной y_b , а термы T_2^x , T_3^x и T_4^x – для выходной переменной y_a , что сказывается на общем объеме продукционных правил, особенно при разработке многосвязных нечетких систем, где

$$y = f(x_1, \dots, x_s).$$

Кроме того, объединение термов может привести к некорректной работе дефазсификаторов при использовании некоторых типов функций принадлежности (например, треугольной) и к ряду сложностей при формировании системы продукционных правил.

Локальное терм-деление устраняет эти проблемы и позволяет вести разработку нечеткой АСУ в полном соответствии с техническим заданием.

При необходимости можно выделить критически важные продукционные правила, в которых используются термы непрерывных величин, помеченные как «критические» для указания их особой важности (например, при определении крайних диапазонов значений, которые сигнализируют аварийную ситуацию).

Количество критических правил для каждой группы взаимосвязанных переменных $R_{гр.кр}^g$ может быть рассчитано следующим образом:

$$R_{гр.кр}^g = R_{гр}^g - \prod_{i=1}^{n_g} (k(x_i) - k_{кр}(x_i)),$$

где $k_{кр}$ – количество критических термов, определенных для входных переменных x в объеме n_g , образующих группу с порядковым номером g ; $R_{гр}^g$ – максимальное количество продукционных правил группы:

$$R_{гр}^g = \prod_{i=1}^{n_g} k(x_i).$$

3. Описание программного обеспечения регулятора

Ввиду отсутствия в современных средах проектирования и разработки нечетких регуляторов возможностей для определения взаимосвязей переменных, перехода от общего терм-деления входных переменных к локальным терм-делениям применительно к выходным переменным, а также инструментов глубокого анализа системы продукционных правил авторами был разработан программный комплекс, предназначенный для визуальной разработки

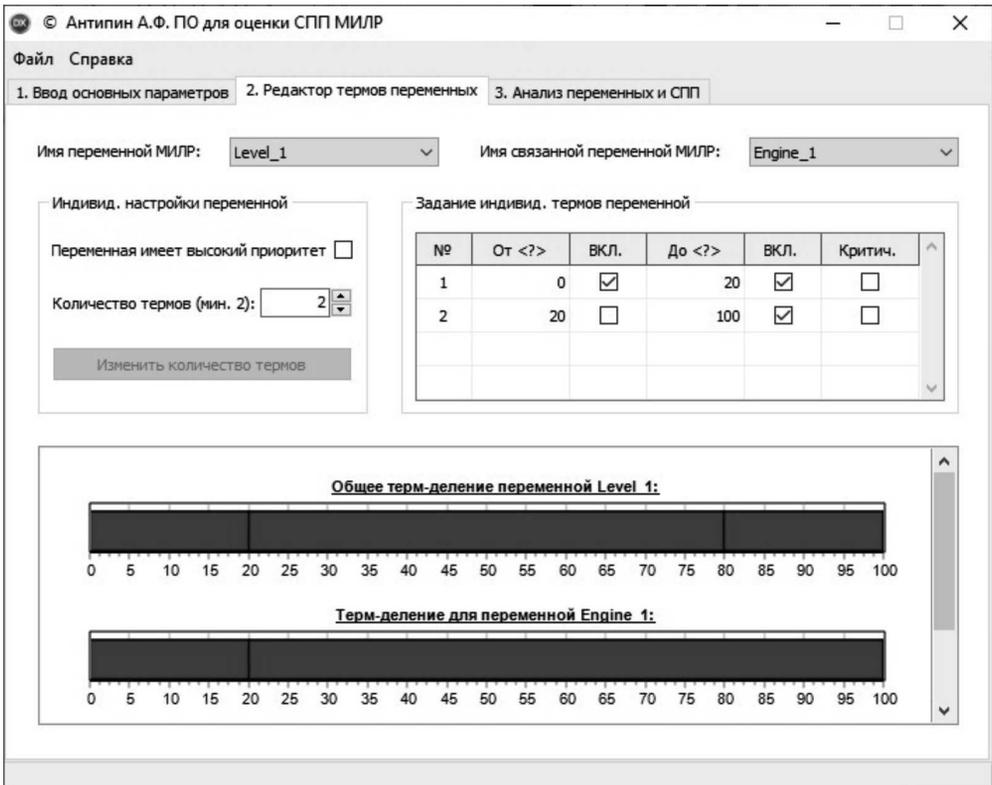


Рис. 4. Редактор термов непрерывных величин и их взаимосвязей.

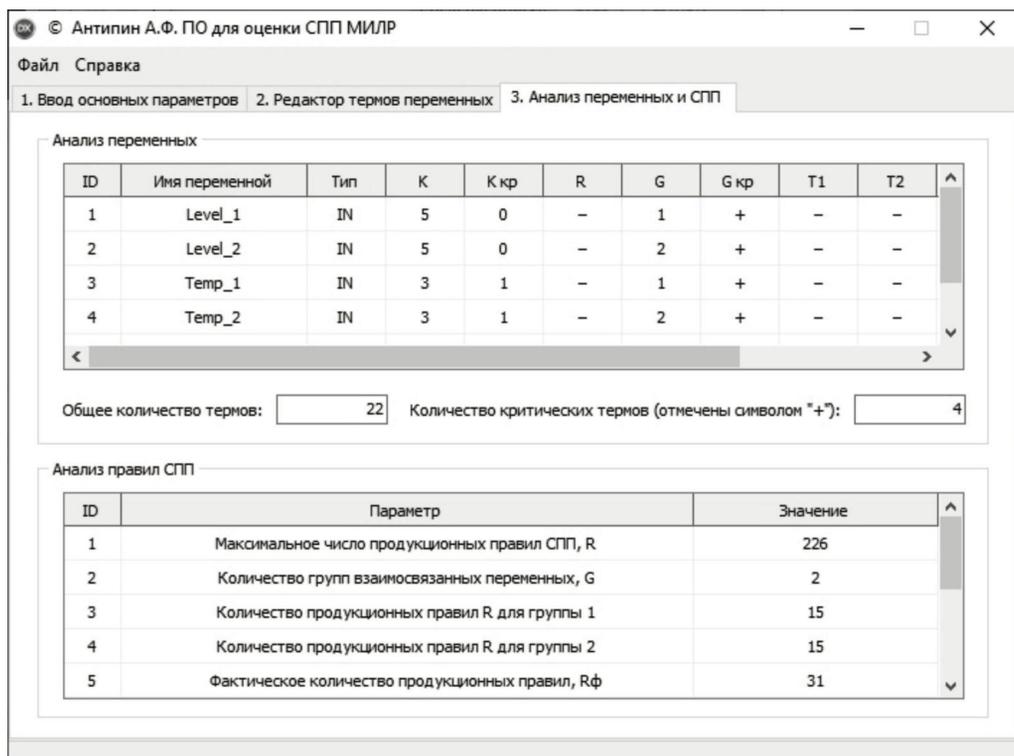


Рис. 5. Результаты анализа переменных и системы продукционных правил.

ПЛК-программы описанной в статье модификации многомерного нечеткого регулятора, расчета и анализа основных параметров, формирования продукционных правил и пр., что показано на рис. 4, 5.

При создании нового проекта нечеткого регулятора вводится следующая основная информация: количество входных и выходных переменных, их рабочие диапазоны значений и взаимные связи. Редактирование термов и ввод продукционных правил производится в специальном визуальном редакторе.

По окончании ввода данных имеется возможность выполнить анализ термделений переменных и системы продукционных правил. При этом оценивается общее количество термов и количество критических термов (для регулятора в целом и отдельно для каждой переменной), принадлежность переменных к конкретной группе (контуру регулирования) и пр.

В отдельную таблицу выводятся значения параметров регулятора, которые зависят от содержимого системы продукционных правил (рис. 5):

- 1) максимальное R_{\max} и фактическое R'_{\max} количество продукционных правил, образующих систему продукционных правил регулятора;
- 2) количество групп взаимосвязанных переменных;
- 3) количество продукционных правил для каждой группы $R_{гр}^g$ и количество критических правил $R_{гр.кр}^g$ и пр.

```

VAR_INPUT
  NUM: INT;
  ...
  OUT_RM: ARRAY [0..R-1] OF BYTE;
END_VAR

VAR_OUTPUT
  ...
  OUT_M: REAL;
END_VAR

VAR
  ...
  OUT_MM: ARRAY [0..K(OUT_M)] OF REAL;
END_VAR
...

//ДЕФАССИФИКАТОР M
IF BYTE_TO_INT(OUT_RM[NUM]) > 0
  THEN OUT_M := (OUT_MM[BYTE_TO_INT(OUT_RM[NUM]) - 1]
    + OUT_MM[BYTE_TO_INT(OUT_RM[NUM])]) / 2;
END_IF;

```

Рис. 6. Программный код функционального блока дефаззификации.

Настройки взаимосвязей и терм-деления переменных могут быть помещены в отдельный файл специального формата и загружены в систему автоматизированного проектирования, разработанную авторами и описанную в [19], которая содержит редактор системы продукционных правил, а также соответствующие инструменты для проверки ее полноты и правильности вводимых пользователем данных.

По окончании работы возможна генерация готовой программы регулятора и/или отдельных функциональных блоков (фаззификаторов, дефаззификаторов) в формате языков программирования SCL и AWL для программируемых логических контроллеров Simatic S7 с учетом требований стандарта ГОСТ Р МЭК 61131-7-2017 «Контроллеры программируемые. Ч. 7. Программирование нечеткого управления».

На рис. 6 представлен фрагмент сгенерированного программного кода функционального блока дефаззификации на языке программирования SCL для выходной непрерывной величины M , четкое значение которой находится путем вычисления середины интервала терма, активного в текущий момент времени [18].

4. Вычислительный эксперимент

Проведем вычислительный эксперимент, связанный с оценкой системы продукционных правил нечеткого регулятора при переходе от общего терм-деления входных переменных к локальному терм-делению.

Рассмотрим контур регулирования с четырьмя входными и двумя выходными непрерывными величинами x и y соответственно, схема взаимосвязей

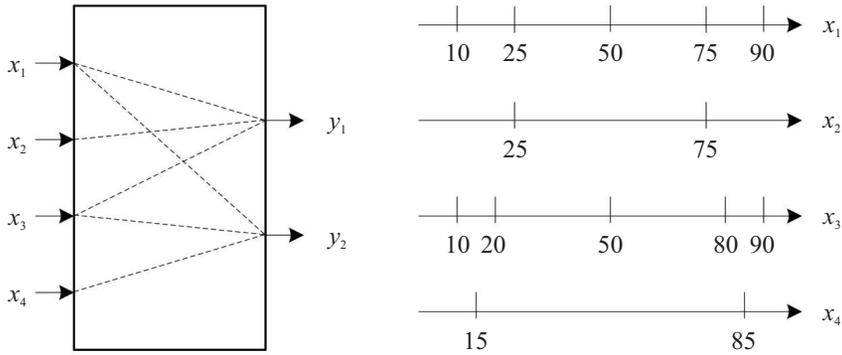


Рис. 7. Схема взаимосвязей и общее терм-деление входных переменных.

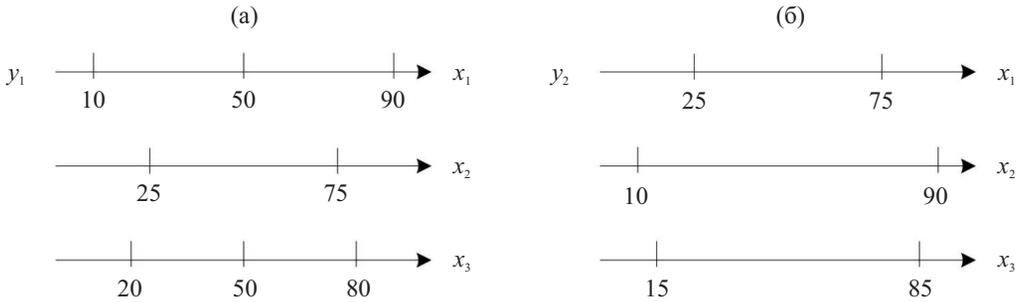


Рис. 8. Локальное терм-деление входных переменных x_1 , x_2 , x_3 и x_4 для выходных переменных (а) y_1 и (б) y_2 .

и общие терм-деления которых в рабочем диапазоне $[0; 100]$ (в упрощенном виде) приведены на рис. 7. Так как термы выходных величин не влияют на общий объем продукционных правил, то для выполнения расчетов они могут быть опущены.

Терм-множества входных непрерывных величин имеют вид:

$$\begin{aligned}
 T^{x_1} &= \{T_1(0), T_2(10), T_3(25), T_4(50), T_5(75), T_6(90; 100)\}, \\
 T^{x_2} &= \{T_1(0), T_2(25), T_3(75; 100)\}, \\
 T^{x_3} &= \{T_1(0), T_2(10), T_3(20), T_4(50), T_5(80), T_6(90; 100)\}, \\
 T^{x_4} &= \{T_1(0), T_2(15), T_3(85; 100)\}.
 \end{aligned}$$

Таким образом, $k(x_1) = 6$, $k(x_2) = 3$, $k(x_3) = 6$, $k(x_4) = 3$. Максимальное количество продукционных правил R_{\max} равно:

$$R_{\max} = \prod_{i=1}^4 k(x_i) = 324.$$

Данное количество правил будет предельно избыточным и сильно усложнит формирование системы продукционных правил регулятора. Однако определенные взаимосвязи позволяют на этапе разработки регулятора перейти от

общего к локальному терм-делению, а затем вводить продукционные правила отдельно для каждой выходной переменной.

Известно, что входные переменные x_1 , x_2 и x_3 связаны с выходной переменной y_1 , а x_1 , x_3 и x_4 – с y_2 . Их локальное терм-деление показано на рис. 8.

Терм-множества входных непрерывных величин x_1 , x_2 , x_3 при локальном терм-делении для выходной непрерывной величины y_1 будут иметь вид:

$$\begin{aligned} T^{x_1^{y_1}} &= \{T_1(0), T_2(10), T_3(50), T_4(90; 100)\}, \\ T^{x_2^{y_1}} &= \{T_1(0), T_2(25), T_3(75; 100)\}, \\ T^{x_3^{y_1}} &= \{T_1(0), T_2(20), T_3(50), T_4(80; 100)\}. \end{aligned}$$

Терм-множества входных непрерывных величин x_1 , x_3 , x_4 при локальном терм-делении для выходной непрерывной величины y_2 будут иметь вид:

$$\begin{aligned} T^{x_1^{y_2}} &= \{T_1(0), T_2(25), T_3(75; 100)\}, \\ T^{x_3^{y_2}} &= \{T_1(0), T_2(10), T_3(90; 100)\}, \\ T^{x_4^{y_2}} &= \{T_1(0), T_2(15), T_3(85; 100)\}. \end{aligned}$$

В табл. 2 приведены данные о количестве термов входных переменных x применительно к конкретным выходным переменным y .

Таблица 2. Данные для анализа терм-связей переменных

Выходная переменная	Количество термов входных переменных			
	x_1	x_2	x_3	x_4
y_1	4	3	4	–
y_2	3	–	3	3

Таким образом, с учетом известных взаимосвязей между входными и выходными величинами, максимальное количество продукционных правил R'_{\max} будет равно:

$$R'_{\max} = \sum_{j=1}^2 R_{\max}^{y_j} = k(x_1)k(x_2)k(x_3) + k(x_1)k(x_3)k(x_4) = 75.$$

Сокращение максимального числа продукционных правил ΔR_{\max} составит:

$$\Delta R_{\max} = \frac{R_{\max} - R'_{\max}}{R_{\max}} = 0,8,$$

или в 4,3 раз.

Данный процесс может быть автоматизирован при использовании описанного выше программного обеспечения. Результаты расчетов позволяют оценить сложность разработки, а также сохранить настройки взаимосвязей и

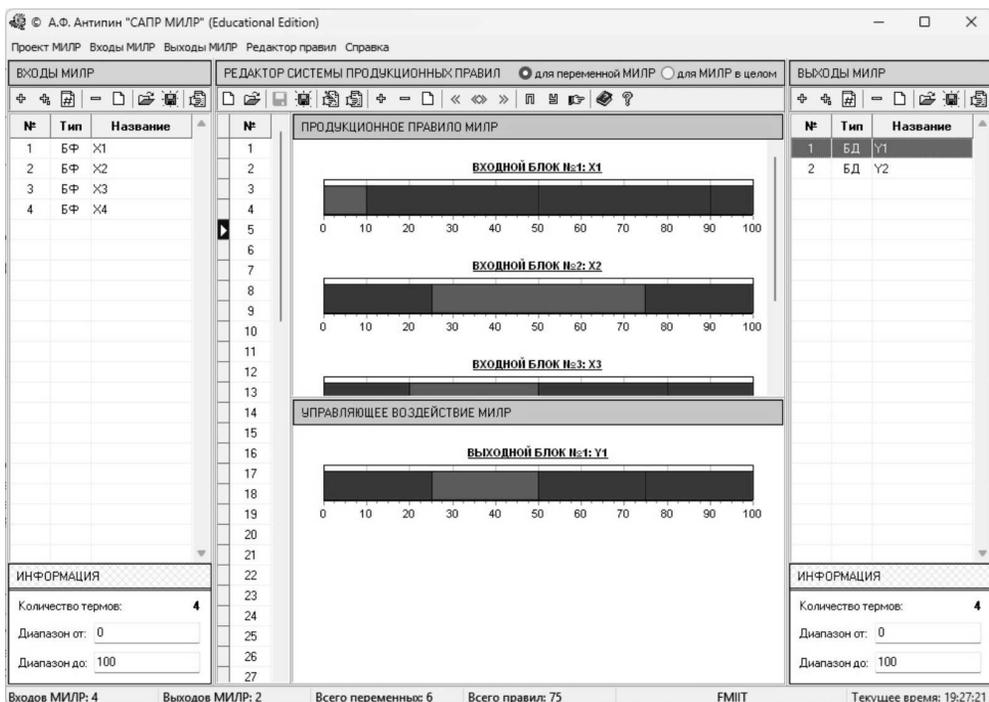


Рис. 9. Редактор системы автоматизированного проектирования.

терм-деления переменных для последующего формирования СПП в разработанной авторами системе автоматизированного проектирования, как показано на рис. 9.

Работа в единой среде визуального программирования упрощает разработку программы многомерного нечеткого регулятора со взаимосвязанными регулируемыми параметрами, а также расчет базовых характеристик.

5. Заключение

Использование при разработке АСУ описанной в статье модификации многомерного многосвязного нечеткого регулятора дает ряд преимуществ, связанных с гибкостью настройки термов переменных, сокращением максимального количества продукционных правил, заданием отдельной функции дефаззификации для каждой выходной переменной [20] и пр.

Разработанное авторами специальное программное обеспечение содержит инструменты для визуальной разработки нечеткого регулятора, оценки и анализа системы продукционных правил, генерации готовой программы для ПЛК Simatic S7. Данное программное обеспечение может применяться специалистами в сфере разработки АСУ сложными технологическими процессами, не имеющими адекватных математических моделей, и обеспечить создание надежных и эффективных ПЛК-программ нечетких регуляторов, сократив при этом срок их разработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dumitrescu C., Ciotirnae P., Vizitiu C.* Fuzzy Logic for Intelligent Control System Using Soft Computing Applications // *Sensors*. 2021. V. 21. No. 8. P. 2617. <https://doi.org/10.3390/s21082617>
2. *Васильев В.И., Ильясов Б.Г.* Интеллектуальные системы управления. Теория и практика. М.: Радиотехника, 2009.
3. *Kocian J., Koziorek J., Pokorný M.* Implementation of fuzzy logic control based on PLC // *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA*. 2011. P. 1–8. <https://doi.org/10.1109/ETFA.2011.6059049>
4. *Nguyen L., Novák V.* Forecasting seasonal time series based on fuzzy techniques // *Fuzzy Sets and Systems*. 2019. V. 361. P. 114–129. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2018.09.010>
5. *Пегат А.* Нечеткое моделирование и управление. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009.
6. *Boukezzoula R., Coquin D., Nguyen T.L. et al.* Multi-sensor information fusion: Combination of fuzzy systems and evidence theory approaches in color recognition for the NAO humanoid robot // *Robot. Autonom. Syst.* 2018. V. 100. P. 302–316. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2017.12.002>
7. *Melin P., Castillo O., Kacprzyk J. et al.* Fuzzy Logic in Intelligent System Design. Springer, 2018.
8. *Филимонов А.Б., Филимонов Н.Б.* Некоторые проблемные аспекты нечеткого ПИД регулирования // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2018. Т. 19. № 12. С. 762–769. <https://doi.org/10.17587/mau/19.762-769>
9. *Быковцев Ю.А., Лохин В.М.* Оценка точности системы управления с нечетким ПИД регулятором на основе аппроксимации статической характеристики регулятора // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2021. Т. 22. № 12. С. 619–624. <https://doi.org/10.17587/mau.22.619-624>
10. *Bobyry M.V., Emelyanov S.G.* A nonlinear method of learning neuro-fuzzy models for dynamic control systems // *Appl. Soft. Comput.* 2020. V. 8. P. 106030. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.106030>
11. *Karakuzu C., Karakaya F., Pavuslu M.A.* FPGA implementation of neuro-fuzzy system with improved PSO learning // *Neural Networks*. 2016. V. 76. P. 128–140. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2016.02.004>
12. *Zhirabok A.N., Suvorov A.Yu., Shumskii A.E.* Robust diagnosis of discrete systems with delay: Logic-dynamical approach // *J. Comput. Syst. Sci. Int.* 2014. V. 53. No. 1. P. 47–62. <https://doi.org/10.1134/S1064230714010134>
13. *Verma O.P., Jain V., Gumber R.* Simple fuzzy rule based edge detection // *J. Inform. Proc. Syst.* 2013. V. 9. No. 4. P. 575–591. <https://doi.org/10.3745/JIPS.2013.9.4.575>
14. *Yongming Li, Yali Li, Zhanyou M.* Computation tree logic model checking based on possibility measures // *Fuzzy Sets and Systems*. 2015. V. 262. P. 44–59. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1401.4658>
15. *Игнатъев В.В., Соловьев В.В.* Метод синтеза нечетких регуляторов на основе кластеризации // *Программные продукты и системы*. 2021. Т. 34. № 4. С. 597–607. <https://doi.org/10.15827/0236-235X.136.597-607>
16. *Богачёв И.С., Коломыцев В.Г.* Методика настройки нечеткого регулятора с нелинейной характеристикой Р-типа средствами Matlab // *Современные наукоемкие технологии*. 2020. № 11-1. С. 9–14. <https://doi.org/10.17513/snt.38330>

17. *Buriboev A., Kang H.K., Ko M.-C. et al.* Application of Fuzzy Logic for Problems of Evaluating States of a Computing System // Appl. Sci. 2019. V. 9. No. 15. P. 3021. <https://doi.org/10.3390/app9153021>
18. *Антипин А.Ф., Антипина Е.В.* Многомерный многосвязный нечеткий интервально-логический регулятор // Мехатроника, автоматизация, управление. 2024. Т. 25. № 2. С. 72–78. <https://doi.org/10.17587/mau.25.72-78>
19. *Антипин А.Ф., Антипина Е.В.* Среда визуальной разработки программ многомерных нечетких интервально-логических регуляторов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23. № 5. С. 1041–1049. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-5-1041-1049>
20. *Антипин А.Ф., Антипина Е.В.* Моделирование технологических процессов и объектов на основе нечеткой логики с использованием многомерных интервально-логических регуляторов // Автометрия. 2020. Т. 56. № 1. С. 83–92. <https://doi.org/10.15372/AUT20200109>

Статья представлена к публикации членом редколлегии Р.А. Мунасыповым.

Поступила в редакцию 25.03.2024

После доработки 16.02.2025

Принята к публикации 26.02.2025