

УДК 681.5:004.4

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ НЕЧЁТКОЙ ЛОГИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОМЕРНЫХ ИНТЕРВАЛЬНО-ЛОГИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ

© А. Ф. Антипин, Е. В. Антипина

*Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета,
453103, г. Стерлитамак, просп. Ленина, 49
E-mail: andrejantipin@ya.ru*

Рассматриваются особенности нечёткого моделирования технологических процессов и объектов, для которых невозможно или затруднительно построение адекватных математических моделей, с использованием многомерных интервально-логических регуляторов. Описываются предлагаемые алгоритмы и разработанное программное обеспечение. Приводятся результаты расчётов с применением способов нечёткого моделирования, показывающих высокую точность.

Ключевые слова: моделирование, многомерный интервально-логический регулятор, нечёткая логика, автоматическое регулирование, программное обеспечение.

DOI: 10.15372/AUT20200109

Введение. В настоящее время многомерные нечёткие регуляторы всё чаще находят применение при разработке систем управления сложными технологическими процессами и объектами, для которых невозможно составить адекватную математическую модель, а использование стандартных ПИД-регуляторов достаточно затруднительно как для их настройки, так и для необходимости постоянной корректировки коэффициентов.

Однако при использовании нечётких регуляторов также имеют место некоторые трудности, связанные с выбором типа функции принадлежности μ переменных и составлением системы продукционных правил, что оказывает существенное влияние на погрешность вычислений и, как следствие, на итоговый результат.

Решить проблему могут специальные методы и разработанное на их основе программное обеспечение, позволяющие построить нечёткую модель работы как самих регуляторов, так и системы автоматического регулирования в целом в кратчайшие сроки по имеющимся экспертным данным, описывающим какой-либо технологический процесс и (или) объект, подлежащий автоматизации.

Современные прикладные пакеты программ дают возможность имитировать работу нечётких регуляторов, но только после полной настройки их параметров, что в некоторых случаях представляет собой достаточно длительный процесс, который к тому же необходимо повторить многократно.

Всё вышесказанное относится и к многомерным интервально-логическим регуляторам (МИЛР), которые являются разновидностью нечётких регуляторов с прямоугольной функцией принадлежности переменных. В МИЛР термины «фаззификация» и «дефаззификация» заменены альтернативными «интервализация» и «деинтервализация». Так, интервализация представляет собой процесс определения принадлежности значения переменной МИЛР к тому или иному интервалу (или терму), входящему в диапазон значений данной переменной, и наоборот, деинтервализация — процесс выделения чёткого значения переменной МИЛР из интервала, входящего в её диапазон значений [1].

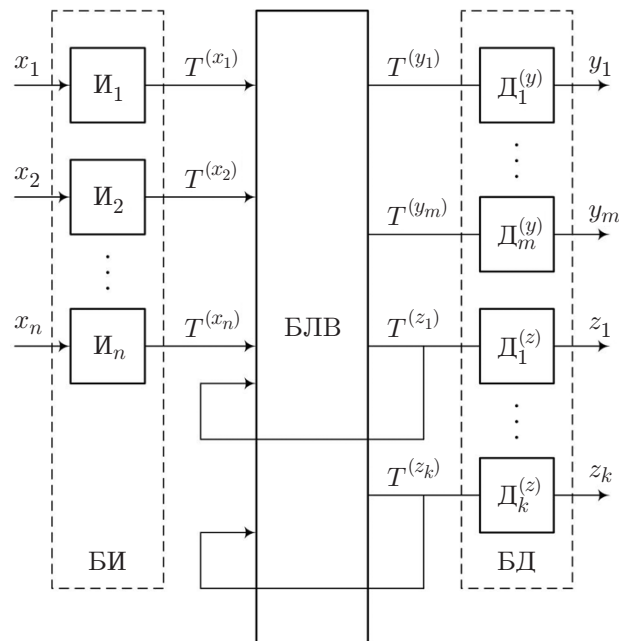


Рис. 1. Блок-схема МИЛР

Проблемам разработки автоматизированных систем управления с использованием нечётких регуляторов посвящён ряд работ [2–10], однако вопросы нечёткого моделирования технологических процессов и объектов с помощью МИЛР в них не отражены.

Таким образом, вышеприведённые доводы позволяют считать способы нечёткого моделирования систем с соответствующими регуляторами актуальной научной проблемой, решение которой ускорит их разработку, повысит эффективность и точность получаемых результатов.

Целью данного исследования является разработка методов и алгоритмов нечёткого моделирования технологических процессов и объектов с применением многомерных интервально-логических регуляторов, а также создание соответствующего программного обеспечения (ПО) для автоматизации процедуры построения моделей и настройки их параметров.

Нечёткое моделирование с использованием МИЛР. На рис. 1 изображена сокращённая блок-схема МИЛР, где x и y — входные и выходные переменные; z — выходные переменные, используемые в условной части продукционных правил; И и Д — интерваллизаторы и деинтерваллизаторы, т. е. устройства, предназначенные для интерваллизации и деинтерваллизации значений переменных МИЛР; БИ и БД — условные блоки интерваллизации и деинтерваллизации; T — термы переменных МИЛР; БЛВ — блок логического вывода, содержащий систему продукционных правил (СПП), управляющих работой МИЛР.

Таким образом, в процессе настройки МИЛР необходимо определить:

- 1) количество переменных и их тип; значения z подаются на входы, снимаются с выходов БЛВ одновременно и, как следствие, оказывают влияние на логический вывод;
- 2) взаимосвязи между всеми переменными МИЛР (более подробно о настройке взаимосвязей переменных МИЛР и о её необходимости см. в [11]);
- 3) как минимум, один набор экспериментальных (экспертных) данных.

После этого выполняется следующий набор действий, который при необходимости можно автоматизировать и реализовать в виде программы или приложения.

1. Производится интерпретация всех переменных МИЛР эквивалентной совокупностью термов по алгоритму, реализующему так называемое «правило 3 термов», согласно

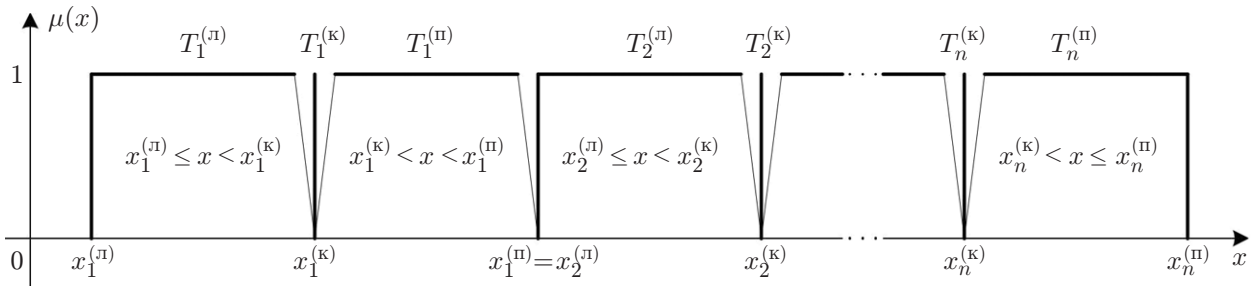


Рис. 2. Пример схемы интервализации

которому одно известное значение переменной МИЛР интерпретируется 3 термами: одним центральным, или нулевым, указывающим её точное значение, и двумя крайними, или окрестными (расположенными с обеих сторон центрального терма), определяющими допустимую погрешность вычислений, другими словами:

а) значения, введённые в качестве экспертных данных, принимаются за контрольные точки, которые представляют собой нулевые термы вида $[p^{(k)}; p^{(k)}]$, где $p^{(k)}$ — конкретное значение какой-либо переменной МИЛР;

б) интервалы значений переменных МИЛР между контрольными точками делятся пополам, образуя левый и правый окрестные термы, которые для граничных контрольных термов, определяющих рабочие диапазоны значений переменных МИЛР, будут иметь одинаковую ширину.

На рис. 2 приведён один из вариантов схемы интерпретации непрерывной величины x совокупностью термов T согласно «правилу 3 термов», где $x_i^{(k)}$, $i = 1, 2, \dots, n$, — n значений (контрольных точек) x_i ; $x_i^{(n)}$ и $x_i^{(n)}$ — левое и правое крайние значения x_i , определяющие её окрестность и рассчитываемые по выражениям

$$x_i^{(n)} = \begin{cases} x_i^{(k)} - (x_{i+1}^{(k)} - x_i^{(k)})/2, & i = 1; \\ x_i^{(k)} - (x_i^{(k)} - x_{i-1}^{(k)})/2, & i > 1, \end{cases} \quad x_i^{(n)} = \begin{cases} x_i^{(k)} + (x_{i+1}^{(k)} - x_i^{(k)})/2, & i < n; \\ x_i^{(k)} + (x_i^{(k)} - x_{i-1}^{(k)})/2, & i = n. \end{cases}$$

Термы T определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} T_i^{(k)}, & \text{ если } x = x_i^{(k)}, \quad i \text{ — любое;} \\ T_i^{(n)}, & \text{ если } x \in [x_i^{(n)}; x_i^{(k)}), \quad i \text{ — любое;} \\ T_i^{(n)}, & \text{ если } x \in (x_i^{(k)}; x_i^{(n)}), \quad i < n; \\ T_i^{(n)}, & \text{ если } x \in (x_i^{(k)}; x_i^{(n)}], \quad i = n. \end{aligned}$$

Для прочих вариантов распределения термов T многомерным интервально-логическим регулятором определение границ их диапазонов будет иным.

К преимуществам данного способа интервализации следует отнести тот факт, что при точном совпадении значения переменной МИЛР с термом $T^{(k)}$, определяющим какую-либо контрольную точку, погрешность вычислений будет равна нулю, чего достаточно трудно добиться при использовании функций принадлежности, отличных от прямоугольной, а также при выборе другого способа интерпретации переменных МИЛР.

2. Составляется система продукционных правил МИЛР по схеме, изображённой на рис. 3, из которой следует, что контрольным термам входных переменных будут соот-

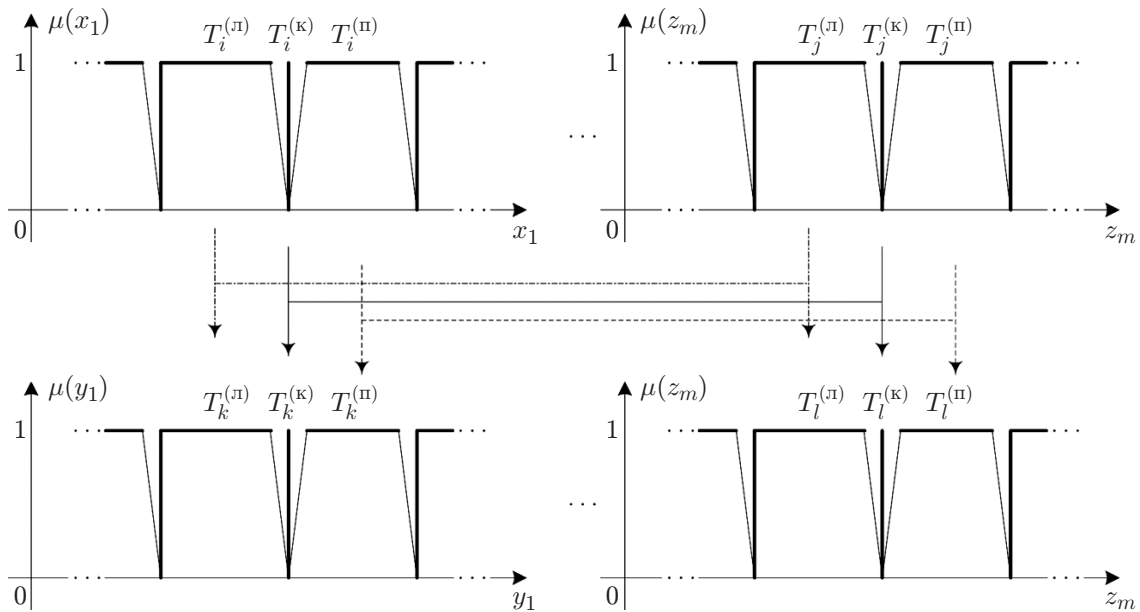


Рис. 3. Схема интервально-логического вывода для составления СПП МИЛР

ветствовать контрольные термы взаимосвязанных выходных переменных, а крайним термам — соответствующие им крайние термы.

Как видно из схемы, термы переменных z_1, \dots, z_k МИЛР также оказывают влияние на значения выходных переменных МИЛР при наличии взаимосвязей, которые в ряде случаев могут быть замкнуты на себя, так как текущее значение выходной переменной z_1, \dots, z_k МИЛР может оказывать влияние на собственное значение, формируемое на следующей итерации работы МИЛР.

Деинтервализация значений выходных переменных производится в зависимости от термов входных переменных МИЛР. Так, чёткое значение непрерывной величины z в конкретном интервале (в терме T_t) может быть найдено [12, 13]:

1) путём вычисления значения функции $f_t(x_1, x_2, \dots, x_s)$, определённой для терма T_t , в котором находится нужное значение регулируемой переменной в момент t , в зависимости от значений s переменных x , связанных с ней (данный способ является сложно реализуемым на практике, так как предполагает известность всех функций, что в ряде случаев бывает невозможно);

2) путём вычисления середины найденного интервала или терма T_t (этот способ является стандартным для МИЛР, так как в качестве значения выходной переменной принимается середина интервала терма, установленного в результате отработки механизма логического вывода МИЛР);

3) определением позиций текущих значений переменных x_1, x_2, \dots, x_s МИЛР в границах термов T_t , при этом значение регулируемой переменной z находится следующим образом (так называемый пропорциональный алгоритм деинтервализации):

— если результирующий терм выходной переменной является контрольным, то в качестве значения выходной переменной z принимается $z_i^{(\kappa)}$, где i — номер результирующего терма;

— в противном случае значение выходной переменной z МИЛР определяется пропорционально значениям связанных с ней s входных переменных x в рамках интервалов их

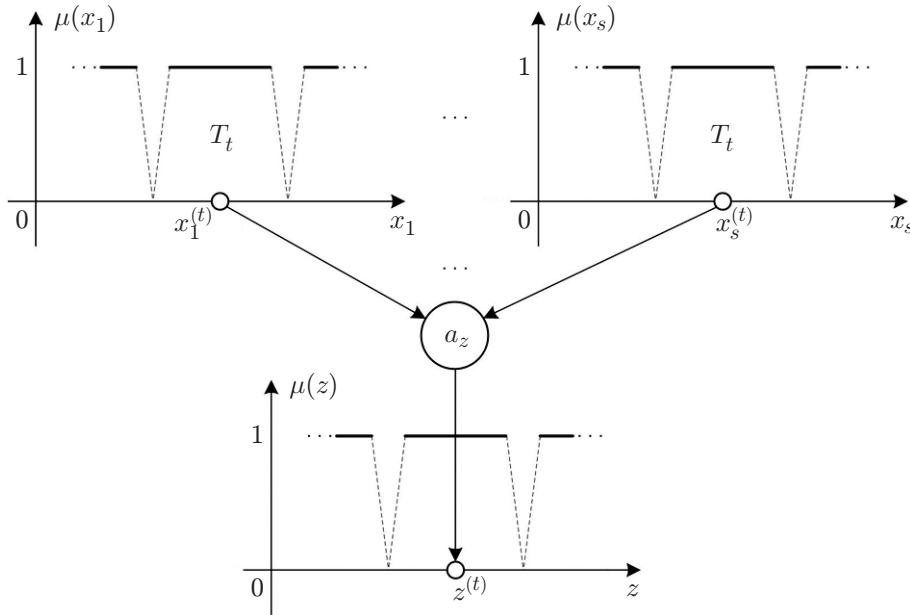


Рис. 4. Схема деинтервализации выходной переменной z МИЛР

крайних термов по следующим выражениям:

$$z = z_i^{(\text{нач})} + k(z)(z_i^{(\text{кон})} - z_i^{(\text{нач})}),$$

$$k(z) = \sum_{i=1}^s k_i^{(x)}, \quad k(x) = \frac{x - x_i^{(\text{нач})}}{x_i^{(\text{кон})} - x_i^{(\text{нач})}}, \quad x_i^{(\text{нач})} \neq x_i^{(\text{кон})},$$

где k — коэффициент пропорциональности; $x_i^{(\text{нач})}$, $x_i^{(\text{кон})}$ и $z_i^{(\text{нач})}$, $z_i^{(\text{кон})}$ — начальные и конечные значения интервалов i -х результирующих термов переменных МИЛР.

Данный способ может быть дополнен при необходимости описания зависимостей между переменными МИЛР, отличными от пропорциональной, как на рис. 4.

Так, после определения позиций s переменных x МИЛР, связанных с регулируемой величиной z , в границах их термов T_t рассчитывается значение коэффициента a_z , который используется при вычислении чёткого значения величины $z^{(t)}$ при условии, что все переменные в рассматриваемый момент времени t заданы ненулевыми термами с одинаковой шириной, т. е.

$$z^{(t)} = z_{\text{н}}^{(t)} + a_z(z_{\text{к}}^{(t)} - z_{\text{н}}^{(t)}),$$

$$a_z = \left(\sum_{n=1}^{s_{\text{обр}}} v(x_n) + \sum_{i=1}^s (-1)^d \text{pos}^{n_i}(x_i^{(t)})v(x_i) \right) / \sum_{i=1}^s v(x_i),$$

где $z_{\text{н}}^{(t)}$ и $z_{\text{к}}^{(t)}$ устанавливают начальную и конечные границы интервала, или терма T_t , в котором находится точное значение величины z ; $\text{pos}(x_i^{(t)})$ — функции, задающие позиции текущих значений входных переменных МИЛР в границах их термов T_t ; $v(x)$ определяет степень влияния переменной x на значение величины z ; d устанавливает вид зависимости

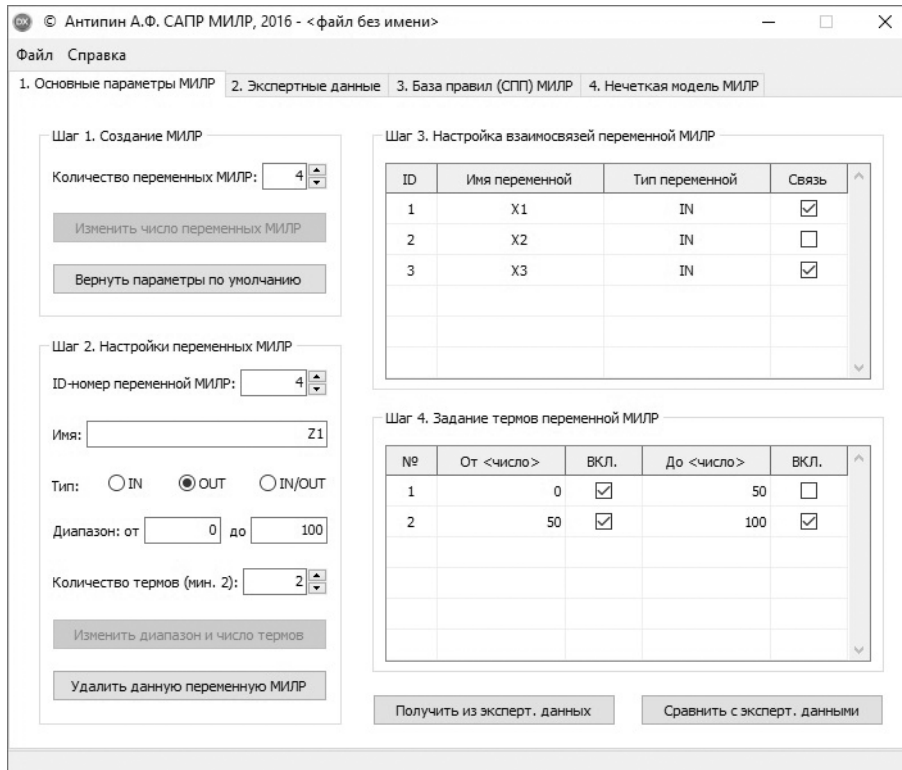


Рис. 5. Программное обеспечение для работы с МИЛР

(прямой или обратной) значения величины z от значений, связанных с ней s переменных x МИЛР; $s_{\text{обр}}$ — количество переменных x таких, что z обратно зависит от x ; n определяет степенную зависимость переменных x и z при необходимости.

Если термы переменных МИЛР имеют разную ширину, то следует произвести корректировку значений их степеней влияния $v(x)$ по алгоритму, приведённому в [9].

Этот способ достаточно сложен в реализации и применим только в случаях, когда имеются точные экспертные данные, а также возможно проведение экспериментов, связанных с отключением отдельных контуров регулирования. При этом повышение точности вычислений сводится в итоге к увеличению общей совокупности термов или к изменению вида выражений для расчёта a_z и (или) $z^{(t)}$.

Предлагаемый метод и алгоритмы реализованы в виде программного обеспечения, позволяющего моделировать работу МИЛР, главное окно которого изображено на рис. 5.

На первом шаге с приложением задаётся общее число переменных МИЛР, после чего выполняется конфигурирование, связанное с заданием имён переменных, выбором их типа (входная, выходная, входная/выходная) и настройкой взаимных связей. При необходимости можно вручную выполнить интерпретацию переменных термами, т. е. задать диапазон значений, указать количество термов, их интервалы и т. п.

Затем вводится, как минимум, один набор экспертных (исходных) данных. Чем больше их будет введено, тем точнее описание МИЛР и, как следствие, модель.

На рис. 6 показан фрагмент СПП, которая создаётся автоматически. При необходимости систему продукционных правил можно корректировать, используя для этого возможности и инструментарий графического языка программирования STEP-GRAPH, специально разработанного для наглядного описания логики работы МИЛР.

На рис. 7 показано окно для работы с готовой моделью МИЛР, созданной автоматически по имеющимся исходным данным.

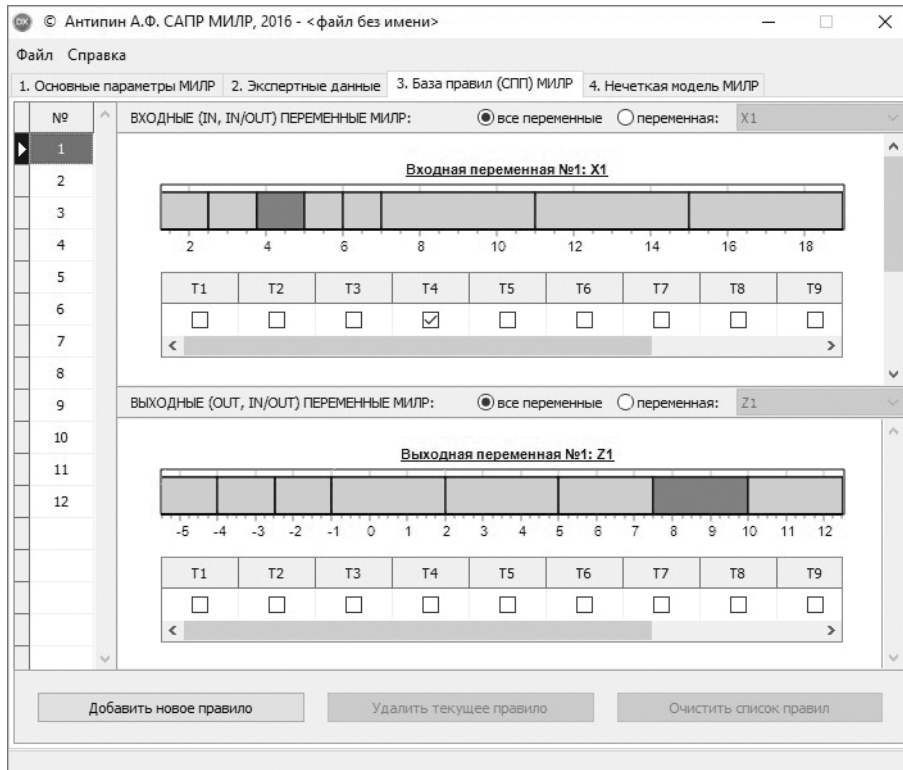


Рис. 6. Фрагмент продукционного правила СПП МИЛР

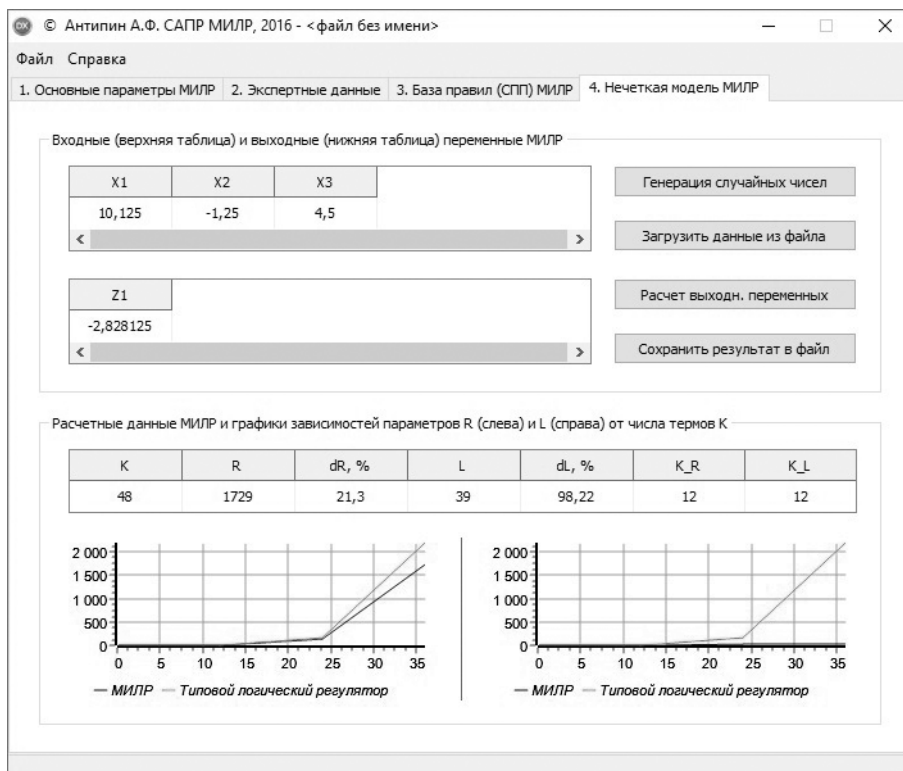


Рис. 7. Окно для работы с нечёткой моделью МИЛР

Таблица 1

№	x	y
1	0	-5
2	5	145
3	10	1095
4	15	3595
5	20	8395

Таблица 2

№	x	y	$y_T^{(1)}$	$E, \%$	$y_T^{(3)}$	$E, \%$	$y_n^{(3)}$	$E, \%$
1	0	-5	-5	0,0	-5,0	0,0	-5	0,0
2	4	75	145	93,3	107,5	43,3	115	53,3
3	8	571	1095	91,8	857,5	50,2	715	25,2
4	12	1867	1095	41,3	1720,0	7,9	2095	12,2
5	16	4347	3595	17,3	4795,0	10,3	4555	4,8
6	20	8395	8395	0,0	8395,0	0,0	8395	0,0

Таблица 3

№	x_1	x_2	y
1	0	0	0
2	0	5	-25
3	10	0	1000
4	10	5	975

Таблица 4

x_1		x_2		y	
x_n	x_k	x_n	x_k	y_n	y_k
0	10	0	5	-25	1000

Помимо функции расчёта значений выходных переменных по заданным значениям входных переменных МИЛР приложение выводит список характеристических параметров МИЛР, таких как общее число термов K , максимальное число продукционных правил R , количество производимых операций сравнения L и других, а также графики зависимостей параметров R и L от K .

При необходимости можно изменять и дополнять наборы экспертных данных в целях получения МИЛР, обладающего требуемыми свойствами. Повторный расчёт характеристик МИЛР, как и формирование новой СПП, будет выполнен автоматически.

Таким образом, используя программное обеспечение, можно за короткое время и с наименьшими усилиями оценить работу МИЛР на достаточно малом наборе исходных данных и, следовательно, системы автоматического регулирования на его основе.

Результаты вычислительных экспериментов. Выполнение методик, соблюдение «правила 3 термов» в процессе интерпретации переменных МИЛР и определение взаимных связей между ними позволяет выполнять более точный поиск значений регулируемых переменных в процессе работы.

Для иллюстрации рассмотрим пример нечёткого моделирования функции $y = x^3 + x^2 - 5$. Исходные данные для составления нечёткой модели приведены в табл. 1. Результаты расчётов сведены в табл. 2, где $y_T^{(1)}$ — значение переменной y при использовании стандартного алгоритма деинтервализации; $y_T^{(3)}$ — значение переменной y в результате использования «правила 3 термов» и стандартного алгоритма деинтервализации; $y_n^{(3)}$ — то же, что и $y_T^{(3)}$, но с пропорциональным алгоритмом деинтервализации; E — относительная погрешность вычислений. Из табл. 2 следует, что в результате использования «правила 3 термов» МИЛР выдаёт более точный результат. Погрешность расчётов можно снизить путём задания дополнительных наборов исходных данных.

Рассмотрим пример нечёткого моделирования с применением альтернативного способа деинтервализации с учётом взаимного влияния переменных МИЛР. Пусть имеется некоторое устройство, основанное на МИЛР, работа которого описывается набором экспертных данных, приведённых в табл. 3. Устройство имеет 2 входа x_1 и x_2 и один выход y . Из табл. 3 следует, что x_1 имеет прямой вид зависимости с y , а x_2 — обратный. Таким образом, $s = 2$, а $s_{обр} = 1$.

Для интерпретации переменных МИЛР термами необходимо выбрать интервалы с максимально возможным диапазоном значений, как в табл. 4.

Из табл. 3 также следует, что значение переменной y увеличивается на 1000 при повышении значения переменной x_1 на 10, а при росте значения переменной x_2 на 5, наоборот, уменьшается на 25. Таким образом, с учётом двукратной разности ширины термов переменных x_1 и x_2 (о чём говорится в [11]),

$$v(x_1) = 100k(x_1) = 100 \cdot 2 = 200, \quad v(x_2) = 5k(x_2) = 5 \cdot 1 = 5,$$

$$\sum_{i=1}^2 v(x_i) = v(x_1) + v(x_2) = 200 + 5 = 205.$$

Выражения для расчётов a_y и $y^{(t)}$ имеют вид

$$y^{(t)} = -25 + a_y(1000 + 25), \quad a_y = \frac{5 + 200 \operatorname{pos}^3(x_1^{(t)}) - 5 \operatorname{pos}(x_2^{(t)})}{205}.$$

Так как значение y меняется на 1000 при относительно малом изменении значения x_1 на 10, можно предположить между ними степенной вид зависимости, т. е. $n = 3$, что и было использовано в выражении для расчёта a_y .

Протестируем работу полученной нечёткой модели МИЛР при значениях переменных $x_1 = 7$ и $x_2 = 4$. В качестве функции контроля возьмём выражение

$$y_k^{(t)} = x_1^3 - 5x_2.$$

Позиции переменных x_1 и x_2 относительно границ их термов будут равны:

$$\operatorname{pos}(x_1^{(t)}) = 0,7, \quad \operatorname{pos}(x_2^{(t)}) = 0,8.$$

Таким образом, расчётный коэффициент $a_y = 0,34$, чёткое значение регулируемой величины $y^{(t)} = 323$, а значение контрольной функции $y_k^{(t)} = 323$, что подтверждает достижение требуемой точности вычислений.

Заключение. Описанные в данной работе алгоритмы нечёткого моделирования предполагают их использование только в тех случаях, когда доступно некоторое словесное описание технологического процесса и (или) объекта, возможно проведение экспериментов, связанных с отключением отдельных контуров регулирования, а также если неизвестен точный вид функций $f_t(x_1, x_2, \dots, x_s)$. К преимуществам применения разработанных алгоритмов относятся:

- 1) возможность получения предварительных данных о работе МИЛР в условиях частичной неопределённости и недостаточности исходной информации;
- 2) простота создания нечёткой модели, высокая скорость обработки исходных данных и выдачи результатов моделирования в соответствующем прикладном программном обеспечении и пр.

Приведённые расчёты показывают достаточно высокую точность результатов, получаемых при использовании описанных в работе способов нечёткого моделирования и эффективность их применения в моделировании технологических процессов и объектов, для которых невозможно или затруднительно построение адекватных математических моделей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Антипин А. Ф.** Об ускорении отклика систем управления реального времени на базе многомерных интервально-логических регуляторов // *АиТ*. 2015. № 3. С. 135–143.
2. **Sugeno M.** On stability of fuzzy systems expressed by fuzzy rules with singleton consequents // *IEEE Trans. Fuzzy Syst.* 1999. 7, Iss. 2. P. 201–224.
3. **Усков А. А.** Системы с нечёткими моделями объектов управления. Смоленск: СФ РУК, 2013. 153 с.
4. **Усков А. А., Лаврушин В. М.** Системы управления с нечёткими супервизорными ПИД-регуляторами // *Информационные технологии моделирования и управления*. 2015. 93, № 3. С. 279–285.
5. **Васильев В. И., Ильясов Б. Г.** Интеллектуальные системы управления. Теория и практика. М.: Радиотехника, 2009. 388 с.
6. **Муравьева Е. А.** Автоматизированное управление промышленными технологическими установками на основе многомерных логических регуляторов: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Уфим. гос. авиац.-техн. ун-т. Уфа, 2013. 367 с.
7. **Седова Н. А.** Нечёткая производственная модель первичной оценки опасности столкновения судов // *Мир транспорта*. 2015. 13, № 2. С. 200–206.
8. **Седова Н. А., Седов В. А.** Логико-лингвистическая модель оценки уровня аварийных ситуаций // *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Сер. Естественные и технические науки*. 2016. № 2. С. 65–69.
9. **Пегат А.** Нечёткое моделирование и управление. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. 798 с.
10. **Митрошин В. Н., Рогачев Г. Н., Чостковский Б. К., Рогачев Н. Г.** Применение нечёткой логики в задачах оптимизации непрерывно-дискретных систем управления многооперационными технологическими процессами // *Автометрия*. 2019. 55, № 4. С. 71–78.
11. **Антипин А. Ф.** Особенности настройки взаимосвязей и составления системы производственных правил в интервально-логическом регуляторе // *Информационные системы и технологии*. 2015. № 1. С. 5–13.
12. **Антипин А. Ф.** Способ повышения точности дефаззификации в многомерных нечётких интервально-логических регуляторах // *Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности*. 2017. № 4. С. 24–28.
13. **Степашина Е. В., Байтимерова А. И., Мустафина С. А.** О свойствах решений задач моделирования каталитических процессов с переменным реакционным объёмом // *Журнал Средневолжского математического общества*. 2010. 12, № 3. С. 122–128.

Поступила в редакцию 26.06.2019

После доработки 07.10.2019

Принята к публикации 08.10.2019