

СПОСОБ ФАЗЗИФИКАЦИИ ЗНАЧЕНИЙ НЕПРЕРЫВНЫХ ВЕЛИЧИН С ПРЕДСКАЗАНИЕМ ТЕРМОВ В МНОГОМЕРНОМ ЧЕТКОМ ЛОГИЧЕСКОМ РЕГУЛЯТОРЕ

А.Ф. Антипин (Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета)

Рассматривается способ фаззификации значений непрерывных величин с последовательным и параллельно-последовательным сканированием интервалов и с предсказанием термов в многомерном четком логическом регуляторе, позволяющий повысить быстродействие систем управления на его основе.

Ключевые слова: многомерный четкий логический регулятор, блок предсказания термов, параллельно-последовательное сканирование интервалов, STEP-TIME алгоритм фаззификации.

В последнее время замечен качественный скачок в области автоматизации ТП. Промышленные компании вкладывают значительные суммы в модернизацию своих производств, где все больше внимания уделяется качеству систем автоматизации. При этом все чаще используются нечеткие логические регуляторы, а также различные комбинации регуляторов. В связи с этим, разработка новых методов, способов и алгоритмов фаззификации непрерывных величин приводит к повышению качества регулирования и расширению функциональных возможностей нечетких регуляторов, используемых при автоматизации различных ТП.

Многомерный четкий логический регулятор [1, 2] является альтернативной ступенью развития нечетких логических регуляторов, где основной упор делается на повышение быстродействия системы автоматического регулирования (САР), компенсацию взаимного влияния контуров регулирования и расширение области применения логических регуляторов [3].

Отличительной особенностью структуры многомерного четкого логического регулятора (МЛР) является отказ от обработки системы продукционных правил в блоке логического вывода (БЛВ). Вместо этого в каждом цикле работы МЛР в процессе фаззификации значений непрерывных величин формируется идентификационный номер (ID-номер или ключ) продукционного правила, предназначенный для определения комбинации значений управляющих воздействий в текущий момент времени t . Комбинации значений управляющих воздействий МЛР хранятся в многомерном массиве или базе данных (зависит от технических характеристик используемых устройств). Таким образом, быстродействие МЛР зависит от применяемого способа фаззификации значений непрерывных величин.

Большинство известных способов фаззификации МЛР предполагают ис-

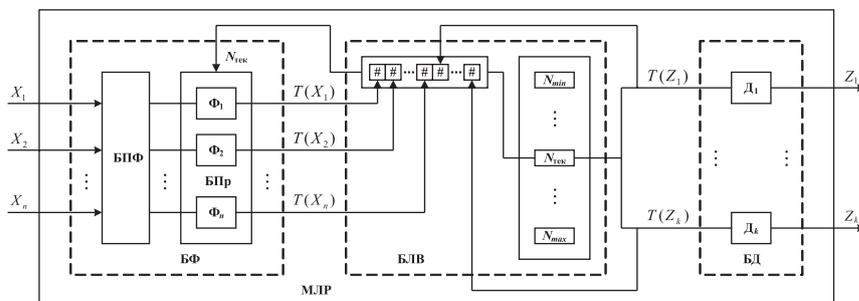


Рис. 1

пользование алгоритмов последовательной обработки непрерывных величин (ANY-TIME, STEP-TIME и др.) [4, 5] и не включают каких-либо элементов для предсказания требуемой комбинации значений управляющих воздействий в текущий момент времени t .

Поэтому актуальным становится предлагаемый способ фаззификации значений непрерывных величин с предсказанием термов, который позволяет повысить быстродействие МЛР в результате замены системы фаззификаторов на блок фаззификации (БФ) и включает:

- а) блок предварительной (первичной) фаззификации значений входных переменных МЛР (БПФ);
- б) блок предсказания термов (БПР).

На рис. 1 представлена развернутая блок-схема МЛР, где $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n$ и D_1, D_2, \dots, D_k — фаззификаторы и дефаззификаторы МЛР соответственно; БФ и БД — блоки фаззификации и дефаззификации, состоящие из фаззификаторов $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n$ и дефаззификаторов D_1, D_2, \dots, D_k МЛР соответственно; X_1, X_2, \dots, X_n и Z_1, Z_2, \dots, Z_k — входные и выходные переменные МЛР соответственно; $T(X_1), T(X_2), \dots, T(X_n)$ и $T(Z_1), T(Z_2), \dots, T(Z_k)$ — порядковые номера четких термов, значения которых равны логической единице, переменных X_1, X_2, \dots, X_n и Z_1, Z_2, \dots, Z_k соответственно; $N_{min}, N_{тек}$ и N_{max} — минимальный, текущий и максимальный идентификационный номер продукционного правила в многомерном массиве или базе данных БЛВ соответственно; # — составляющая идентификационного номера продукцион-

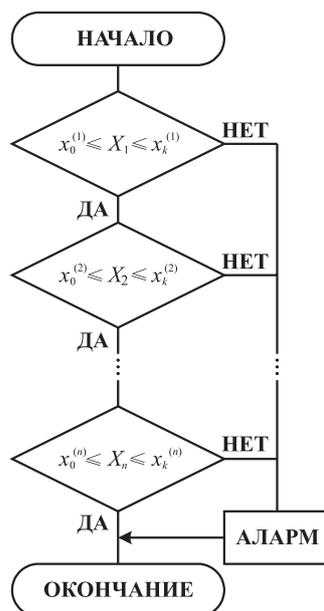


Рис. 2

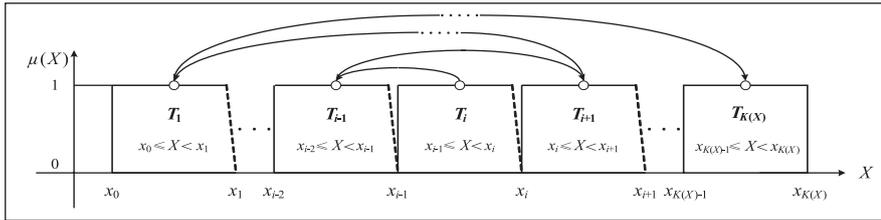


Рис. 3

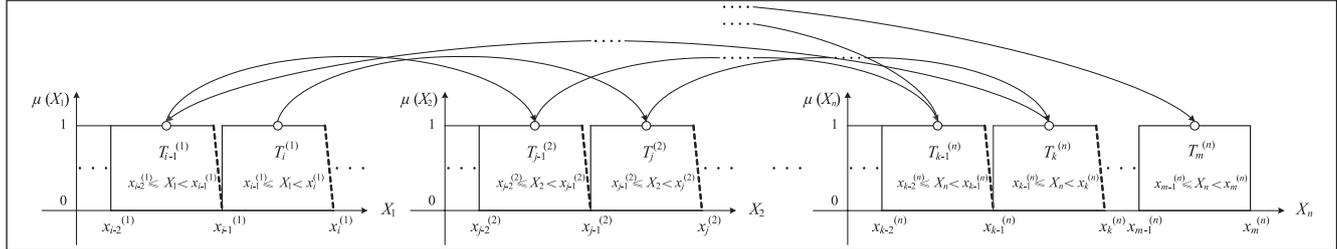


Рис. 4

ного правила МЛР, формируемого из номеров четких термов $T(X_1), T(X_2), \dots, T(X_n)$ и $T(Z_1), T(Z_2), \dots, T(Z_k)$.

Рассмотрим подробнее принцип действия и характерные особенности каждого из нововведенных функциональных блоков МЛР.

Блок предварительной фаззификации МЛР выполняет защитную функцию и предназначен для проверки принадлежности значений непрерывных величин указанным диапазонам. Так при выходе значения какой-либо непрерывной величины за пределы диапазона БПФ выдает сигнал тревоги — ALARM, после чего текущая итерация работы МЛР завершается.

Блок-схема алгоритма работы БПФ представлена на рис. 2, где $x_0^{(1)}, x_0^{(2)}, \dots, x_0^{(n)}$ и $x_k^{(1)}, x_k^{(2)}, \dots, x_k^{(n)}$ — нижние и верхние границы диапазонов входных переменных X_1, X_2, \dots, X_n соответственно.

Следует отметить, что возможен вариант реализации БФ без БПФ. В таком случае принадлежность значений непрерывных величин X_1, X_2, \dots, X_n указанным диапазонам будет устанавливаться непосредственно в БПр в процессе фаззификации переменных МЛР, что увеличит нагрузку на данный блок и снизит быстродействие защитных функций в регуляторе.

Блок предсказания термов МЛР предназначен для окончательной (вторичной) фаззификации значений непрерывных величин с параллельно-последовательным или последовательным сканированием интервалов и предсказанием номеров четких термов, значения которых равны логической единице. Схема работы БПр:

а) на вход БПр подается ID-номер продукционного правила, сформированный в ходе предыдущего цикла работы МЛР;

1) если порядковый номер четкого терма, значение которого равно логической единице, найденный на прошлой итерации, равен n , то сканирование диапазона значений непрерывной величины начинается с интервала, описывающего диапазон значений данного терма;

2) если значение выбранного четкого терма равно логической единице, то фаззификация прекращается, в противном случае БПр сканирует соседние ($n - 1$ и $n + 1$) и последующие интервалы до тех пор, пока не будет найден четкий терм, значение которого равно логической единице.

На рис. 3 представлен пример фаззификации значения непрерывной величины X в результате использования БПр с последовательным сканированием интервалов переменных МЛР, для случая, если порядковый номер четкого терма T , значение которого равно логической единице, найденный на прошлой итерации, — i .

Принцип работы БПр схож с маятником, совершающим незатухающие колебания.

На рис. 4 приведен пример, иллюстрирующий параллельно-последовательное сканирование интервалов значений непрерывных величин X_1, X_2, \dots, X_n , где i, j, k — порядковые номера четких термов, значения которых равны логической единице, переменных X_1, X_2 и X_n , найденные на предыдущей итерации; m — максимальный номер четкого терма переменной X_n .

Как видно из рис. 4, сначала сканируются те четкие термы непрерывных величин, значения которых были равны логической единице на предыдущей итерации. Если значения каких-либо термов по-прежнему равны логической единице

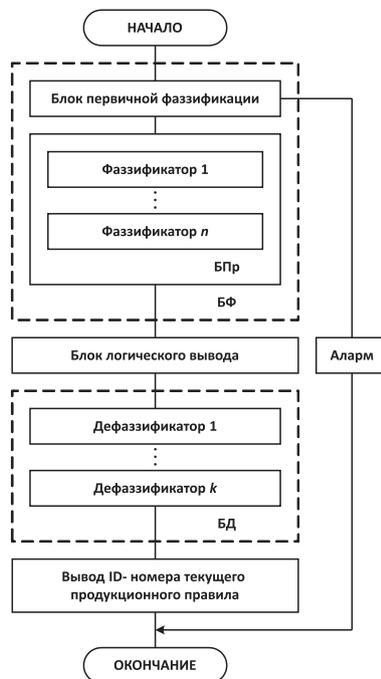


Рис. 5

це, то номера данных термов подаются на выход БПр для формирования идентификационного номера производственного правила, а соответствующие им величины исключаются из процесса. Далее сканируются соседние, а затем и последующие интервалы значений непрерывных величин до тех пор, пока не будут определены все термы.

Таким образом, цикл параллельно-последовательной фаззификации с предсказанием термов состоит из следующей последовательности действий (шагов):

- 1) считываются значения входных переменных X_1, X_2, \dots, X_n МЛР;
- 2) выполняется первичная фаззификация. Если значение какой-либо непрерывной величины выходит за пределы диапазона, то выдается сигнал тревоги — ALARM, после чего текущая итерация завершается;
- 3) считывается ID-номер производственного правила, сформированный на предыдущей итерации. Если текущая итерация — первая, то в качестве ID-номера принимается — N_{max} , так как N_{min} равен 0 по умолчанию;
- 4) выделяются порядковые номера четких термов, значения которых равны логической единице, найденные на предыдущей итерации;
- 5) выполняется вторичная фаззификация. Интервалы значений непрерывных величин МЛР сканируются до тех пор, пока не будут найдены термы, значения которых равны логической единице;

6) осуществляется вывод порядковых номеров четких термов, требуемых для формирования ID-номера производственного правила.

Разница между последовательным и параллельно-последовательным сканированием интервалов значений непрерывных величин МЛР заключается в следующем: в первом случае упор делается на защитные функции МЛР при исключении БПФ, а во втором — на скорость принятия решения (формирования ID-номера производственного правила). При использовании БПФ разница между ними будет минимальной.

Алгоритм работы МЛР с БПФ и БПр в упрощенном виде представлен на рис. 5.

Проведем вычислительный эксперимент и дадим количественную оценку основным характеристикам МЛР с БПФ и БПр при использовании предложенного автором способа фаззификации с предсказанием термов.

Число операций сравнения L МЛР с n входными и k выходными переменными X и Z соответственно зависит от суммарного числа четких термов непрерывных величин и рассчитывается отдельно для каждого функционального блока МЛР:

$$L_{min}^{БПФ} = 1, L_{max}^{БПФ} = 2 \cdot n, L_{сред}^{БПФ} = \frac{L_{min}^{БПФ} + L_{max}^{БПФ}}{2} = n + \frac{1}{2},$$

$$L_{min}^{БПр} = 2 \cdot n, L_{max}^{БПр} = 2 \cdot \sum_{i=1}^n (K(X_i) - 1),$$

$$L_{сред}^{БПр} = \frac{L_{min}^{БПр} + L_{max}^{БПр}}{2} = n + \sum_{i=1}^n (K(X_i) - 1),$$

$$L_{min} = L_{max}^{БПФ} + L_{min}^{БПр} = 4 \cdot n,$$

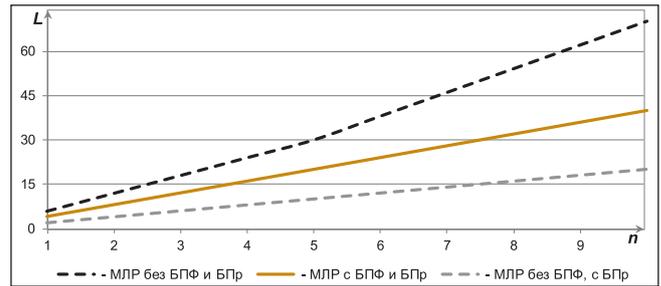


Рис. 6

Таблица 1

n	K	L ()	L_{min} ()	L_{min} ()
1	5	6	4	2
2	10	12	8	4
3	15	18	12	6
4	20	24	16	8
5	25	30	20	10
6	32	38	24	12
7	39	46	28	14
8	46	54	32	16
9	53	62	36	18
10	60	70	40	20

Таблица 2

Тип МЛР	Минимальное время, необходимое для выполнения операций сравнения L МЛР ЦПУ контроллеров Siemens S7, мкс							
	312C	314	315-2DP	317F-2DP	412-2	414-3	416-2F	417-4
1.	3,60	1,80	1,80	1,80	1,80	1,08	0,72	0,54
2.	2,40	1,20	1,20	1,20	1,20	0,72	0,48	0,36
3.	1,20	0,60	0,60	0,60	0,60	0,36	0,24	0,18

$$L = L_{max}^{БПФ} + L_{сред}^{БПр} = 3 \cdot n + \sum_{i=1}^n (K(X_i) - 1),$$

где $L_{min}^{БПФ}, L_{min}^{БПр}, L_{сред}^{БПФ}, L_{сред}^{БПр}, L_{max}^{БПФ}, L_{max}^{БПр}$ — минимальное, среднее и максимальное число операций сравнения в БПФ и БПр соответственно; $K(X_i)$ — число четких термов входной переменной X_i ; L_{min} — минимальное число операций сравнения МЛР.

В случае выхода какой-либо входной непрерывной величины X за пределы диапазона, число операций сравнения L МЛР рассчитывается согласно выражению $L = L_{сред}^{БПФ}$.

При варианте реализации БФ без БПФ изменятся следующие выражения:

$$L_{max}^{БПр} = 2 \cdot \sum_{i=1}^n K(X_i), L_{min} = L_{min}^{БПр} = 2 \cdot n.$$

$$L = L_{сред}^{БПр} = \frac{L_{min}^{БПр} + L_{max}^{БПр}}{2} = n + \sum_{i=1}^n K(X_i),$$

Известно [1], что число операций сравнения МЛР без БПФ и БПр:

$$L = \sum_{i=1}^n (K(X_i) + 1).$$

Из представленных выражений следует, что число операций сравнения МЛР без БПФ и БПр равно среднему числу операций сравнения МЛР без БПФ, с БПр.

На рис. 6 представлены графики зависимостей L МЛР без БПФ и БПр, L_{min} с БПФ и БПр и L_{min} без БПФ, с БПр от числа n входных переменных X МЛР. Графики построены на основании данных табл. 1, где

$$K = \sum_{i=1}^n K(X_i).$$

Таблица 3

n	K	c		, c		L
		L_{min}	L	L_{min}	L	
3	15	12	21	6	18	18

Так как в большинстве случаев непрерывные величины имеют в среднем 5...7 четких термов, из которых: 3 обозначают различные рабочие состояния, 2 — сигнальные состояния и оставшиеся 2 — аварийные состояния, то для построения зависимостей рис. 6 максимальное число термов входной переменной X_n МЛР выбиралось в диапазоне [5; 7] случайным образом.

Из рис. 6 и табл. 1 видно, что при использовании предложенного способа с предсказанием термов (МЛР без БПФ, с БПр) число операций сравнения L снижается в 3...3,5 раза по отношению к двум другим альтернативным способам фаззификации при любом числе входных переменных n .

Далее рассмотрим вариант реализации типовой системы управления расходом воздуха парового котла на основе МЛР с БПФ и БПр на базе контроллеров Siemens S7. Блок-схема системы регулирования представлена на рис. 7, где F_T и F_B — расход топливного газа и воздуха на котел соответственно; Q_K — концентрация кислорода в дымовых газах; Z_B — степень воздействия на направляющий аппарат дутьевого вентилятора; МОУ — многомерный объект управления. Все переменные МЛР определяются пятью четкими термами, обозначающими рабочее, верхние и нижние сигнальные и аварийные состояния соответственно.

Для проведения эксперимента использовались наиболее распространенные ЦПУ контроллеров Siemens S7. Минимальные значения времени, необходимого для выполнения логических операций ЦПУ контроллеров Siemens S7: 312 С — 0,2 мкс; 314 — 0,1 мкс; 315-2DP — 0,1 мкс; 317F-2DP — 0,1 мкс; 412-2 — 0,1 мкс; 414-3 — 0,06 мкс; 416-2F — 0,04 мкс; 417-4 — 0,03 мкс.

В табл. 2 представлены минимальные значения времени t , необходимого ЦПУ контроллеров Siemens S7 для выполнения операций сравнения L в каждом цикле работы МЛР. Из табл. 2 наблюдается значительное сокращение времени обработки операций сравнения МЛР: при использовании БФ с БПФ и БПр — в 1,5 раза, БФ без БПФ, с БПр — в 3 раза.

В табл. 3 приведены значения L_{min} и L для рассматриваемой системы регулирования при использовании различных вариантов построения МЛР.

Так как средняя продолжительность цикла работы МЛР достаточно мала и составляет в среднем 50...200 мс (зависит от технических характеристик используемых устройств автоматизации (контроллеров и пр.)) [6], вероятность изменения ID-номера продукционного правила (то есть хотя бы одного терма n

непрерывных величин X) в каждом цикле сканирования МЛР в большинстве случаев составит $\leq 0,1...0,2$.

Предположим, что вероятности изменения термов непрерывных величин F_T , F_B и Q_K в течение 200 мс одинаковы и равны 0,05. Тогда вероятность изменения ID-номера продукционного правила будет равна:

$$P(X) = 1 - (1 - P(F_T))(1 - P(F_B)) \cdot (1 - P(Q_K)) = 1 - (1 - 0,05)^3 = 0,14,$$

где $P(F_T)$, $P(F_B)$ и $P(Q_K)$ — вероятности изменения термов F_T , F_B и Q_K соответственно.

Таким образом, вероятность точного предсказания ID-номера продукционного правила в каждом цикле сканирования МЛР будет равна:

$$P(\bar{X}) = 1 - P(X) = (1 - 0,05)^3 = 0,86.$$

Это означает, что в текущем цикле работы МЛР с вероятностью 0,86 будет отработано минимальное число операций сравнения L_{min} .

Так как на продолжительность цикла контроллеров оказывает влияние ряд различных факторов (коммуникационная нагрузка, запаздывание сигналов и т. п.), практический выигрыш в быстройдействии будет не столь разителен — 2...4%, но в перспективе, с развитием техники автоматизации, использование МЛР с БПр позволит получить более значимый результат.

Таким образом, предложенный автором способ фаззификации значений непрерывных величин с предсказанием термов позволяет повысить быстродействие многомерного четкого логического регулятора и, как следствие, системы управления на его основе.

Список литературы

1. Антипин А.Ф., Каяшев А.И., Муравьева Е.А. Система автоматического управления элементами дистилляции на базе многомерного логического регулятора // Вестник УГАТУ. Серия "Управление, вычислительная техника и информатика". 2010. Т. 14. № 4.
2. Антипин А.Ф. Система автоматизированной разработки многомерных логических регуляторов с переменными в виде совокупности аргументов двузначной логики // Автоматизация в промышленности. 2011. № 3.
3. Усков А.А. Интеллектуальные системы управления на основе методов нечеткой логики. Смоленск: Смоленская городская типография. 2003.
4. Муравьева Е.А., Каяшева Г.А. Дискретно-логические регуляторы с any-time алгоритмом минимизации времени фаззификации параметров технологических процессов в совокупность четких термов // Вестник УГА-ТУ. Серия "Управление, вычислительная техника и информатика". 2008. Т. 10. № 2.
5. Zilberstein S. Using anytime algorithms in intelligent systems // AI Magazine. 1996. Vol. 17. № 3.
6. Петров И.В. Программируемые контроллеры. Стандартные языки и приемы прикладного проектирования. М.: Солон-Пресс, 2004.

Антипин Андрей Федорович — канд. техн. наук, старший преподаватель Стерлитамакского филиала Башкирского государственного университета.
E-mail: andrejantipin@ya.ru