

А. И. Каяшев, Е. А. Муравьева, Р. Ф. Габитов

SCADA-СИСТЕМА НА ОСНОВЕ МНОГОМЕРНОГО ЧЕТКОГО ЛОГИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЦЕМЕНТНОЙ ПЕЧЬЮ

На основе шестимерного четкого логического регулятора температуры в зонах цементной печи в инструментальной среде TRACE MODE V6.05 разработана SCADA-система управления производством цемента. Компенсация взаимного влияния контуров регулирования произведена дополнительной системой производственных правил, генерирующей функцию, являющуюся обратной по отношению к функции, связывающей данный контур регулятора с остальными его контурами. Информация для синтеза компенсирующей системы правил получена из двух экспериментов на реальном объекте управления: автономном и взаимосвязанном режимах работы каждого контура многомерного регулятора. *Четкий терм; многомерный четкий логический регулятор; SCADA-система; цементная печь*

Необходимость логического управления цементной печью обусловлена сложностью технологического процесса получения цемента (высокая температура (200÷1450 °С), большие габариты печи, вызывающие инерционность и запаздывание исполнения управляющих воздействий, а также взаимное влияние контуров регулирования через объект управления (печь)). Все это затрудняет использование известных типовых методик проектирования классических четких и нечетких регуляторов и не позволяет настроить их на устойчивую работу с необходимой точностью.

В отличие от этого, многомерные четкие логические регуляторы (МЧЛР), благодаря близости идеологии логического управления с четкими термами к человеческому мышлению и естественному языку, позволяют построить алгоритм управления, адекватный реальному технологическому процессу производства цемента [8]. Поскольку потенциальных возможностей по быстрдействию и точности у МЧЛР больше [1, 2, 3, 4, 8], чем у типовых нечетких регуляторов (НР), то целесообразность их использования в качестве регуляторов в системах управления цементной печью становится очевидной.

В данной работе на основе МЧЛР реализовано управление вращающейся печью № 4 ОАО «Сода», диаметром 4 м и производительностью 850 т/сутки (35,416 т/час), которая представляет собой стальной барабан, футерованный внутри огнеупорным кирпичом (рис. 1). Барабан печи установлен с наклоном 4°, на роликовые опоры – 3. Шлам подается с поднятой стороны печи, а топливо в виде газа – с противоположной.

На рис. 2 показано распределение температуры продукта (1) и газового потока (2) по длине барабана вращающейся печи. По оси абсцисс отложена длина отдельных зон печи в процентах к общей ее длине, а по оси ординат – температура продукта и газового потока в каждой точке печи. Ломаный характер кривой температуры материала показывает, что при нагревании сырьевой смеси в ней происходят физико-химические процессы, в одних случаях тормозящие нагревание (пологие участки), а в других – способствующие резкому нагреванию (крутые участки). По значению температуры печное пространство разделено на следующие зоны: I – до 200 °С – сушки шлама; II – (200÷800) °С – подогрева (дегидратации); III – (800÷1000) °С – декарбонизации (кальцинирования); IV – (1000÷1300) °С – экзотермических реакций; V – (300÷1450) °С – спекания; VI – (1300÷1000) °С – охлаждения.

Структурная схема МЧЛР для регулирования температуры в зонах цементной печи с компенсацией влияния на отдельно взятый контур регулирования всех остальных его контуров представлена на рис. 3. Она имеет следующие особенности: входные и выходные параметры представлены совокупностью четких термов; система производственных правил МЧЛР состоит из регулирующей и компенсирующей частей; на вход блока производственных правил подаются не только термы входных (Z_{mi}) и выходных (Z_{im}) лингвистических переменных, но и дискретные входные (X) и выходные (Y) переменные объекта управления; в условной части (антецеденте) производственных правил используются не только термы входных, но и выходных лингвистических переменных, а также дискретные входные и выходные переменные объекта управления.

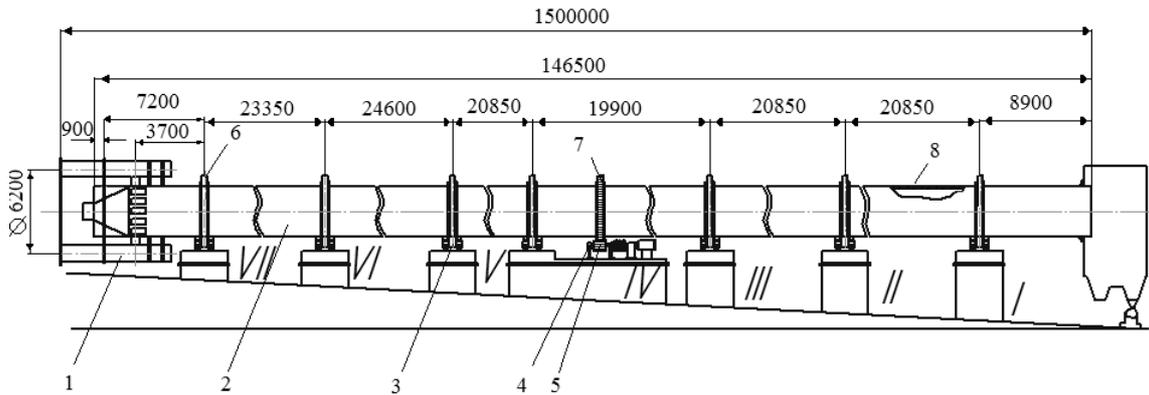


Рис. 1. Вращающаяся печь №4 ОАО «Сода»: 1 – головка печи, 2 – корпус печи, 3 – роликовая опора, 4 – подшипник, 5 – вал подвенцовой шестерни в сборе, 6 – установка бандажа, 7 – шестерня венцов, 8 – футеровка, I, II, III, IV, V, VI, VII – опоры

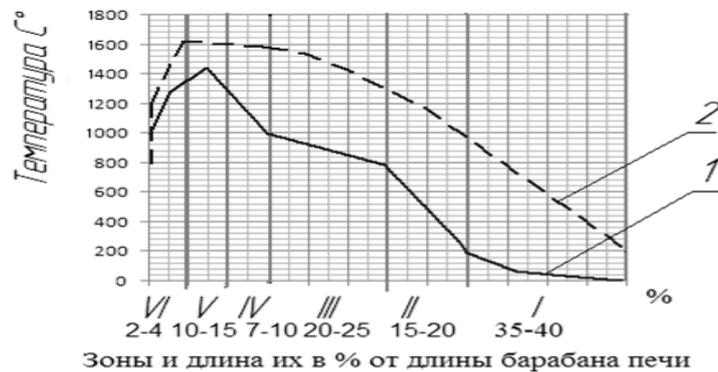


Рис. 2. График распределения температуры

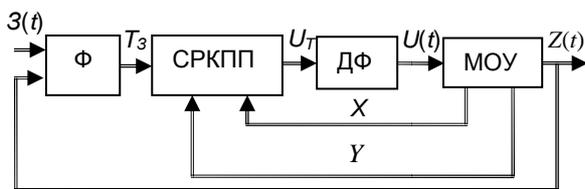


Рис. 3. Структурная схема многомерного четкого логического регулятора цементной печи: Ф – фаззификатор; SRKPP – система регулирующих и компенсирующих продукционных правил; ДФ – дефаззификатор; МОУ – многомерный объект управления (цементная печь); $Z(t)$, $Z(t)$ – векторы задающих, регулируемых и регулирующих параметров; $T_{зз}$, U_T – векторы термов задающих, регулируемых и управляющих параметров соответственно; X и Y – дискретные входные и выходные переменные объекта управления

Векторы, используемые в предложенном МЧЛР, имеют следующую структуру:

$$Z(t) = (Z_1(t), Z_2(t), \dots, Z_i(t), \dots, Z_n(t));$$

$$Z(t) = (Z_1(t), Z_2(t), \dots, Z_i(t), \dots, Z_n(t));$$

$$U(t) = (U_1(t), U_2(t), \dots, U_i(t), \dots, U_n(t));$$

$$T_{зз} = (Z_{1T}, Z_{2T}, \dots, Z_{iT}, \dots, Z_{nT},$$

$$Z_{1T}, Z_{2T}, \dots, Z_{iT}, \dots, Z_{nT});$$

$$U_T = (U_{1T}, U_{2T}, \dots, U_{iT}, \dots, U_{nT});$$

$$X = (X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_{n1});$$

$$Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_i, \dots, Y_{n2}),$$

где $n=6$ – размерность МЧЛР; $n_1 = 18$ и $n_2 = 12$ – число соответственно входных и выходных булевых переменных МОУ.

Центральная проблема при синтезе многомерных регуляторов [5, 6, 7] – компенсация взаимного влияния контуров, в данном случае решается введением для каждого канала регулирования компенсирующей системы продукционных правил, предназначенной для исключения в установившемся режиме взаимного влияния каналов регулирования друг на друга. Как следует из рис. 4, система продукционных правил предлагаемого 6-мерного логического регулятора состоит из 6 программных блоков (ЛР₁ – ЛР₆), каждый из которых включает в себя регулирующие (РСПП₁ ÷ РСПП₆) и компенсирующие (КСПП₁ ÷ КСПП₆) системы продукционных правил. Информацию для разработки компенсирующих систем продукционных правил предла-

гается получить из двух экспериментов при работе МЧЛР с реальным многомерным объектом управления. В первом эксперименте снимается зависимость управляющего воздействия (U_a) от задающего параметра (Z) в автономном режиме работы контуров регулирования МЧЛР (на рис. 5 кривая U_{ai}). На практике автономность работы МЧЛР достигается отключением всех контуров регулирования, кроме того контура, на котором в данный момент снимается указанная зависимость. Число таких зависимостей должно равняться размерности МЧЛР. В ходе второго эксперимента для каждого контура при тех же значениях задающего параметра снимается та же зависимость, но при работе всех остальных контуров МЧЛР в штатном режиме. На рис. 5 такая кривая (U_{mi}) представлена для i -го контура многомерного четкого логического регулятора. Аналогичные зависимости необходимо получить для остальных контуров МЧЛР. Из рис. 5 следует, что заштрихованная площадь характеризует степень влияния на i -й контур всех остальных ($n - 1$) контуров регулирования МЧЛР. Эта же характеристика, но в более лаконичной и удобной форме представлена на рис. 6 в виде разности функций U_{mi} и U_{ai} :

$$U_{pi} = U_{mi} - U_{ai} \tag{3}$$

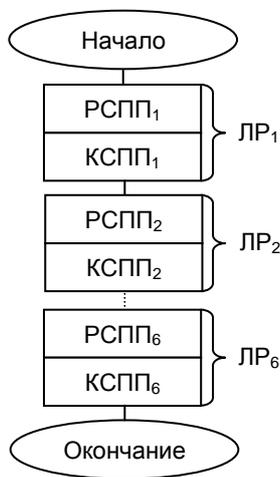


Рис. 4. Логическая структура программно-реализованного 6-мерного четкого логического регулятора цементной печи

Идея компенсации взаимного влияния контуров МЧЛР состоит в выработке с помощью соответствующей системы продукционных правил функции U_{ki} , являющейся зеркальным отображением относительно оси абсцисс экспериментально полученной функции U_{pi} . Совершенно очевидно, что при точной зеркализации функция U_{ki} полностью скомпенсирует влияние других контуров на i -й контур МЧЛР.

Для интерпретации U_{ki} в виде совокупности аргументов двузначной логики использованы четкие термы ($T_1 \div T_9$). Они вырабатываются фаззификатором МЧЛР из условий:

$$\begin{aligned} Z_i &= T_1 \text{ при } 0 \leq Z_i < Z_{1i}; \\ Z_i &= T_2 \text{ при } Z_{1i} \leq Z_i < Z_{2i}; \dots; \\ Z_i &= T_9 \text{ при } Z_8 \leq Z_i < Z_9. \end{aligned}$$

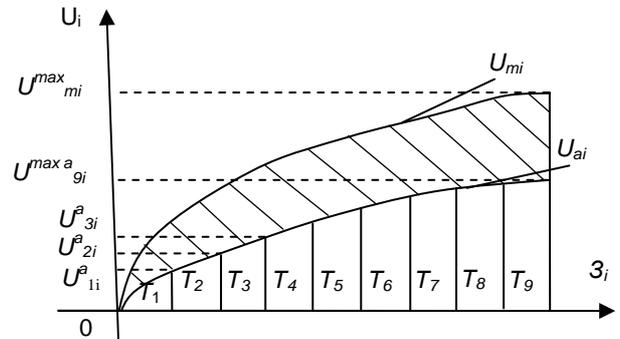


Рис. 5. Зависимость управляющего воздействия U_i от задающего параметра Z_i i -го канала МЧЛР: U_{ai} – в автономном (сепаратном) режиме; U_{mi} – в режиме взаимного влияния контуров регулирования

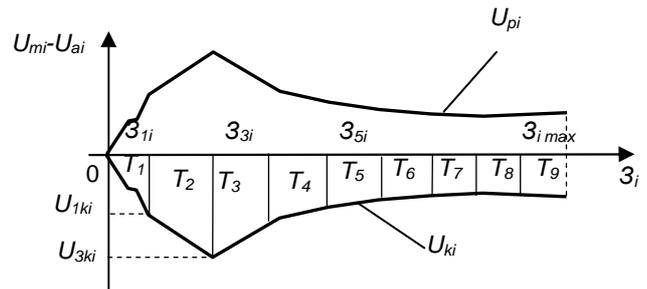


Рис. 6. Функция компенсации U_{ki} влияния ($n-i$) контуров на i -й контур многомерного логического регулятора

Во всех остальных случаях термы ($T_1 \div T_9$) равны логическому нулю. Система продукционных правил, реализующая компенсирующую функцию U_{ki} для i -го контура регулирования с помощью термов ($T_1 \div T_9$), имеет вид:

$$\begin{aligned} \text{Если } Z_i &= T_1, \text{ то } U_{ki} = U_{1ki}; \\ \text{Если } Z_i &= T_2, \text{ то } U_{ki} = U_{2ki}; \\ &\dots \\ \text{Если } Z_i &= T_8, \text{ то } U_{ki} = U_{8ki}; \\ \text{Если } Z_i &= T_9, \text{ то } U_{ki} = U_{9ki}. \end{aligned}$$

Следует отметить, что в общем случае число четких термов для представления функции U_{ki} определяется точностью регулирования и разрешающей способностью программируемого контроллера, на котором построен МЧЛР. Воспроизведение компенсирующих функций для остальных контуров регулирования аналогично.

Термы задающих и регулируемых параметров МЧЛР, а также дискретные сигналы объекта управления имеют единую логическую природу – они являются аргументами двузначной логики. Поэтому в составе условной части продукционных правил МЧЛР появилась возможность использовать не только термы входных, но и выходных параметров регулятора, а также дискретные (входные и выходные) параметры объекта управления. Кроме того, управляющее воздействие в консеквентах правил имеет две составляющие: регулируемую – при отсутствии влияния других контуров МЛР (сепаратный, автономный режим), и компенсирующую, которая при конкретном значении антецедента правила нейтрализует влияние других контуров регулирования. Учет приведенных обстоятельств приводит к изменению структуры системы продукционных правил n -мерного логического регулятора со статической компенсацией взаимного влияния контуров, которая принимает следующий вид:

Если $Z_1 = Z_{11} \cap \text{ДНФ}_{11}$, то $U_{11} = U_{1a1} + U_{1к1}$;

Если $Z_1 = Z_{12} \cap \text{ДНФ}_{12}$, то $U_{12} = U_{1a2} + U_{1к2}$;

...

Если $Z_1 = Z_{1m1} \cap \text{ДНФ}_{1m1}$,

то $U_{1m1} = U_{1am1} + U_{1км1}$;

Если $Z_2 = Z_{21} \cap \text{ДНФ}_{21}$, то $U_{21} = U_{2a1} + U_{2к1}$;

Если $Z_2 = Z_{22} \cap \text{ДНФ}_{22}$, то $U_{22} = U_{2a2} + U_{2к2}$;

...

Если $Z_2 = Z_{2m2} \cap \text{ДНФ}_{2m2}$,

то $U_{2m2} = U_{2am2} + U_{2км2}$;

...

Если $Z_n = Z_{nmn} \cap \text{ДНФ}_{nmn}$,

то $U_{nmn} = U_{namn} + U_{нкmn}$,

где $m_1 \div m_n$ – количество четких термов, используемых для изображения задающих воздействий в $1 \div n$ контуров регулирования МЛР; $Z_1 \div Z_n$ – задающие воздействия $1 \div n$ контуров регулирования; $\text{ДНФ}_{11} \div \text{ДНФ}_n$ – функции двузначной логики в дизъюнктивно-нормальной форме, реализующие взаимные блокировки между контурами регулирования МЧЛР. Например, для первого контура регулирования такая функция может иметь следующий вид:

$$\text{ДНФ}_{11} = \bigcup_{i=1}^n \bigcap_{j_1=1}^{m_{11}} T_{зп}^{1j_1} \bigcap_{j_2=1}^{m_{12}} X^{1j_2} \bigcap_{j_3=1}^{m_{13}} Y^{1j_3},$$

где m_{11} , m_{12} , m_{13} – число литералов термов задающих и регулируемых параметров, а также дискретных входных и выходных параметров объекта управления от смежных контуров регулирования МЧЛР соответственно; $T_{зп}^{1j_1}$, X^{1j_2} ,

Y^{1j_3} – сами литералы четких термов соответственно задающих и регулируемых параметров, дискретных входных и выходных параметров объекта управления, используемых в смежных контурах МЧЛР.

Регулирование температуры в зоне кальцинирования осуществляется изменением подачи газа в печь с помощью одного из шести контуров МЧЛР. Исполнительный механизм представляет собой электропривод, приводящий в движение заслонку на входе дымососа. Датчик расхода газа конструктивно включает в себя сужающее устройство, дифференциальный манометр и датчик перемещения. Датчиком температуры является термопара. Расход топлива и температура газов в печи взаимосвязаны: с повышением расхода температура повышается, и наоборот.

На рис. 7 изображены четкие термы входных лингвистических переменных с указанием диапазонов температуры отходящих газов, измеряемой термопарой. Каждому из указанных термов на универсальной числовой оси соответствует «свой» температурный диапазон. Текущее значение температуры обрабатывается на принадлежность конкретному четкому терму входной лингвистической переменной, и МЧЛР выдает выходной сигнал на исполнительный механизм, который устанавливает жалюзи дымососа холодного конца цементной печи в соответствующее положение. На рис. 8 изображены четкие термы выходных лингвистических переменных, подаваемых на вход дефаззификатора МЧЛР. Функции принадлежности для других контуров регулирования строятся аналогично.

На рис. 9 изображена мнемосхема технологического процесса получения цемента на автоматизированном рабочем месте (АРМ) технолога-оператора. С ее помощью оператор может наблюдать за ходом технологического процесса в реальном времени и вносить свои корректировки. Мнемосхема позволяет оператору «передвигаться» по системе с помощью клавиш: «Главное окно», «Головка печи», «Графики», «Архивы», «Ввод данных», «Отчет тревог». Сырьевой шлам поступает во вращающуюся печь с ее холодного конца, после чего сырье подвергается воздействию температуры в зонах цементной печи в соответствии с графиками, представленными на рис. 2. Результаты измерения температуры в зонах печи отображаются на тренде «Головка печи». На этом же тренде в зонах спекания, кальцинирования и дегидратации (испарения) отображаются результаты регулирования температуры.

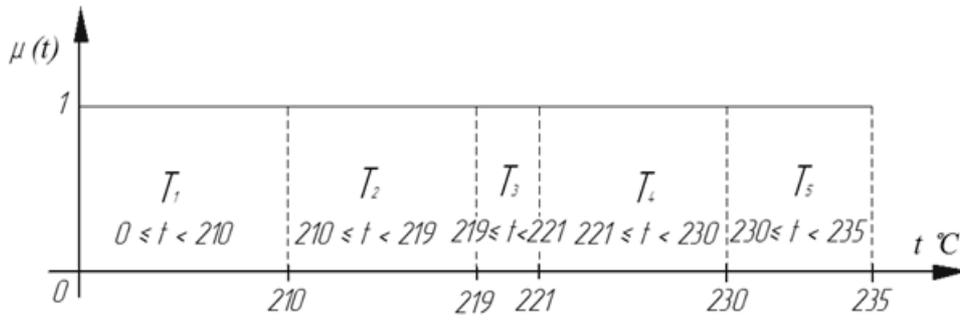


Рис. 7. Размещение четких термов входных лингвистических переменных (температура отходящих газов) на универсальной числовой оси

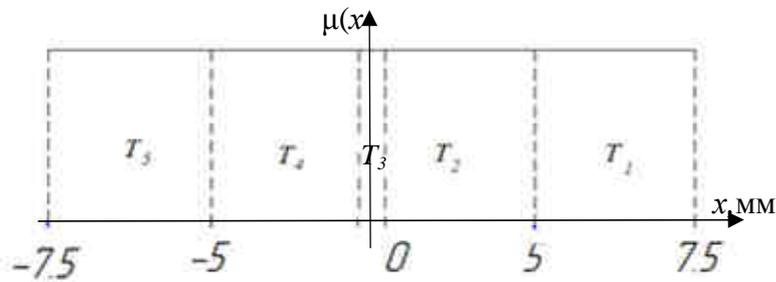


Рис. 8. Размещение четких термов выходной лингвистической переменной (положение жалюзей дымососа) на числовой оси

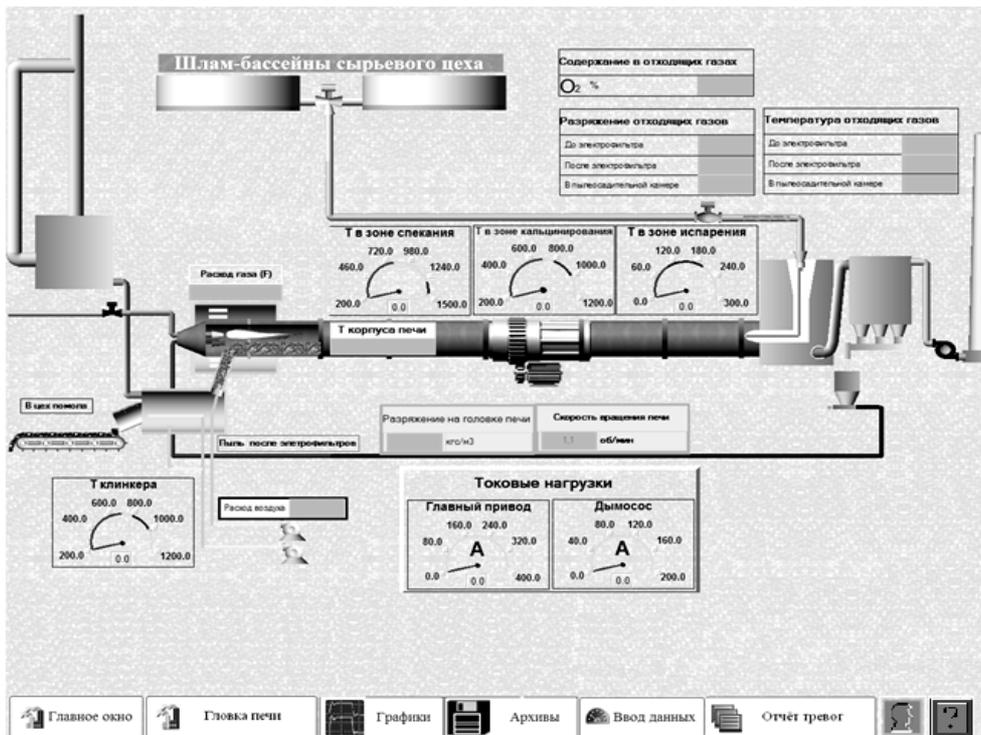


Рис. 9. Мнемосхема-дисплей АРМ оператора-технолога цементной печи

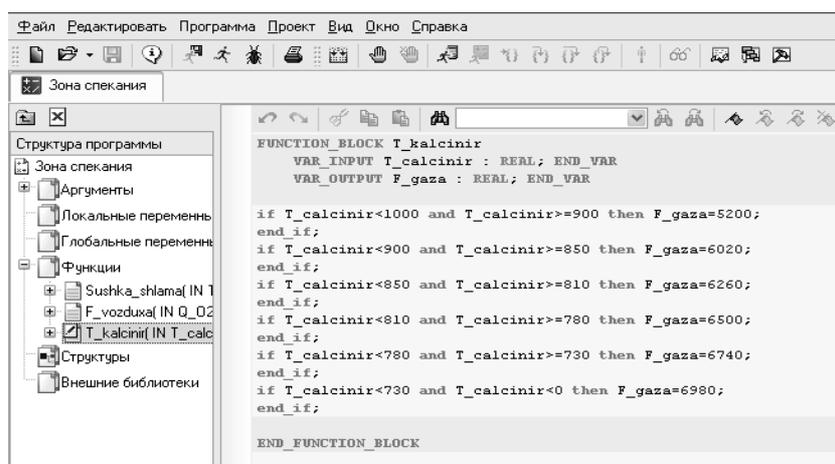


Рис. 10. Система продукционных правил контура температуры в зоне кальцинирования

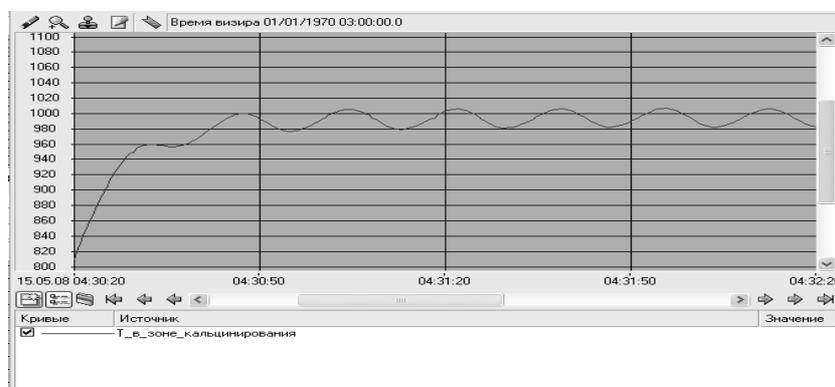


Рис. 11. Кривая изменения температуры во времени в зоне кальцинирования при использовании автономных типовых НР

Система продукционных правил для контура регулирования температуры в зоне кальцинирования, реализованная в интегрированной среде TRACE MODE V6.05, представлена на рис. 10. Для остальных зон цементной печи система правил аналогична.

Программная реализация представленного МЧЛР для управления цементной печью выполнена на языке FBD. Для реализации АРМ требуется персональный компьютер со следующими минимальными характеристиками: Pentium 3,2 ГГц; RAM 1024 Mb; HDD не менее 120 Gb; FDD 1,44 Mb; DVD/CD-RW; сетевая карта для связи с ЛВС предприятия; монитор не менее 19" LCD. Персональный компьютер в диспетчерском пункте должен быть защищен от воздействия вредных веществ, перепада температур, пыли и влажности, а также иметь встроенную плату связи модели 1784-KTX через экранированную витую пару. На рис. 11 приведена кривая изменения температуры в зо-

не кальцинирования во времени при использовании автономного типового НР, из которой следует, что интервал между точками максимума и минимума составляет около 30 °С, что ведет к перерасходу топливного газа. В отличие от них МЧЛР (рис. 12) поддерживает эту же температуру с точностью ± 5 °С. SCADA-система управления цементной печью является открытой, что позволяет вводить дополнительные датчики и исполнительные механизмы, а также повышать точность регулирования за счет увеличения числа четких термов, используемых для интерпретации переменных, и минимизировать цикл сканирования МЧЛР с помощью ANY-TIME алгоритма [8].

Данная система управления не имеет автономной системы противоаварийной защиты, однако при достижении в зоне спекания температуры 1350-1450 °С (предельно допустимое значение) происходит блокировка (отсечка) подачи газа в цементную печь.

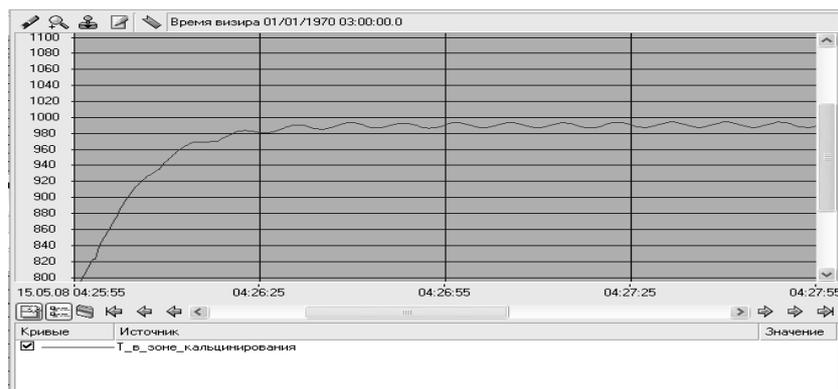


Рис. 12. Кривая изменения температуры во времени в зоне кальцинирования при использовании МЧЛР

ВЫВОДЫ

Интерпретация входных и выходных функций совокупностью четких термов повышает точность и быстродействие логических регуляторов и расширяет их управляющие свойства за счет участия в antecedentesх продукционных правил термов регулируемых параметров, а также дискретных входных и выходных переменных вербально представленных объектов управления. Погрешность многомерных логических регуляторов с четкими термами определяется шириной термов регулируемой величины, что позволяет более точно компенсировать взаимное влияние контуров с помощью специальной компенсирующей системы продукционных правил. Использование многомерного четкого логического регулятора для регулирования температуры в цементной печи позволило повысить точность поддержания температуры в зоне кальцинирования с ± 30 до ± 5 °С, что привело к снижению расхода топливного газа на 40 м³/час.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Круглов В. В., Дли М. И.** Интеллектуальные информационные системы: компьютерная поддержка систем нечеткой логики и нечеткого вывода. М.: Физматлит, 2002.
2. **Леоненков А. В.** Нечеткое моделирование в среде MATLAB и Fuzzy TECH.-СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 736с.
3. **Штовба С. Д.** Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М.: Горячая линия – Телеком, 2007. 288 с.
4. **Штовба С. Д.** Классификация объектов на основе нечеткого вывода // Exponenta Pro: Математика в приложениях. 2004. № 1. С. 68–69.
5. **Гостев В. И.** Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления. К.: Радиоаматор, 2008. 972 с.
6. **Васильев В. И., Ильясов Б. Г.** Интеллектуальные системы управления. Теория и практика: Учеб. пособие. М.: Радиотехника, 2009. 392 с.

7. **Пупков К. А.** Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник / Под ред. Н. Д. Егунова. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 616 с.

8. **Муравьева Е. А., Каяшева Г. А.** Патент № 2309443 РФ // Бюллетень изобретений. 2007. № 39.

ОБ АВТОРАХ



Каяшев Александр Игнатьевич, проф., зав. каф. автоматиз. технолог. и инф. систем фил. УГНТУ в г. Стерлитамак. Д-р техн. наук по автоматиз. и упр. технолог. проц. и произв. Иссл. в обл. интел. упр-я.



Муравьева Елена Александровна, доц. каф. автоматиз. технолог. и инф. систем фил. УГНТУ в г. Стерлитамак. Дипл. инж. (УГНТУ, 1998). Канд. техн. наук по автоматиз. и упр. технолог. проц. и произв. (УГАТУ, 2001). Иссл. в обл. интел. упр-я.



Габитов Руслан Фаритович, асп. фил. УГНТУ в г. Стерлитамак. Иссл. в обл. интел. упр-я.