

## Нечеткая адаптивная система управления обжигом Клинкера во вращающейся печи

В статье предложена структура адаптивной системы управления обжигом клинкера в печи функционирующая по нечеткому алгоритму.

**клинкер, блок адаптации, таблицы лингвистических правил, переходные процессы**

Обжиговая печь для производства цементного клинкера представляет собой вращающуюся на специальных опорах трубу (корпус печи), в которую поступает сырьевая известняково-глиняная смесь. Вследствие вращения и некоторого наклона корпуса смесь постепенно перемещается вдоль корпуса, проходя последовательно зоны подогрева, декарбонизации, спекания и предварительного охлаждения. Сырьевая смесь поступает в короткую вращающуюся обжиговую печь, в которой происходят процессы декарбонизации и спекание смеси до высоких температур с последующим образованием клинкера [1].

Головная часть печи включает в себя установку для подачи первичного воздуха и газа в форсунки печи. В обжиговой печи откорректированную и перемешанную сырьевую смесь подвергают постепенному нагреву до  $1450^{\circ}\text{C}$  и последующему охлаждению, в процессе которых смесь претерпевает сложные физические и химические превращения. По характеру процессов, протекающих в сырьевой смеси во время ее нагревания выделяют следующие температурные зоны: до  $0 - 800^{\circ}\text{C}$  – подогрева (дегидратации),  $800 - 1100^{\circ}\text{C}$  – декарбонизации (кальцинирования);  $1100 - 1300^{\circ}\text{C}$  – экзотермических реакций,  $1300 - 1450 - 1300^{\circ}\text{C}$  – спекания и  $1300 - 1000^{\circ}\text{C}$  – охлаждения (рис.1)

Структуры систем автоматической стабилизации температуры клинкера во вращающихся печах во многом зависят от способа производства цемента, вида топлива, типа холодильника и габаритов печей. Многочисленные исследования показывают, что технологические и теплотехнические процессы, протекающие во вращающихся печах, характеризуются многообразием и сложной взаимосвязью, что существенно затрудняет создание эффективной систем автоматизации [2]. Физические и химические процессы, происходящие во вращающейся печи весьма сложны, зачастую протекают в неопределенных условиях, поэтому управление печью является одной из труднейших задач в рассматриваемой области.

Основные технологические режимы работы обжиговой печи контролируют опытные операторы, и часто переходя на ручной режим управления, они обеспечивают более высокую эффективность протекания технологического процесса. Для использования их знаний и опыта предлагается применить теорию нечетких множеств.

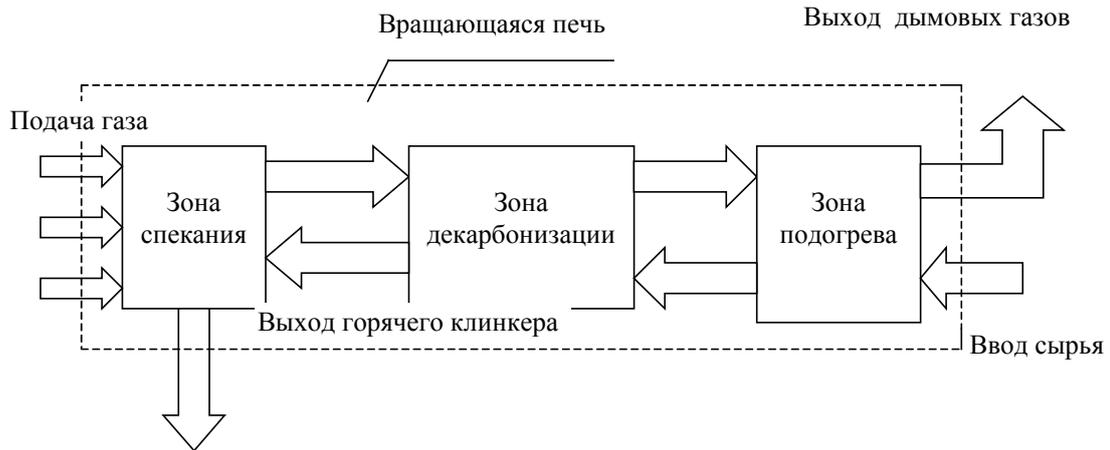


Рисунок 1 – Основные температурные зоны обжиговой печи

Перспективным направлением в развитии нечеткого управления является лингвистический анализ переходных процессов регулирования, когда показатели качества таковых даны в виде таблиц лингвистических правил. В этом случае возможно создание адаптивной нечеткой системы управления, которая, исходя из информации о качестве процесса, будет производить коррекцию правил таблиц нечеткого вывода для сохранения заданного качества процессов управления при изменении значений параметров объекта выходящих за допустимые пределы. [3].

Принцип работы адаптивного нечеткого регулятора заключается в том, что при значительном изменении параметров объекта управления сложившейся текущей ситуации, определяемой отклонением ( $e$ ) и производной отклонения ( $e^*$ ), таблица лингвистических правил (ТЛП) выбирает действие, уже не обеспечивающее необходимое качество регулирования. Одновременно с этим получая информацию об изменении параметров объекта, содержащихся в ситуации ( $e, e^*$ ), блок адаптации или таблица лингвистических правил адаптации (ТЛПА) формирует такую последовательность правил, которые приводят к желаемой переходной характеристике системы управления (рис. 2).

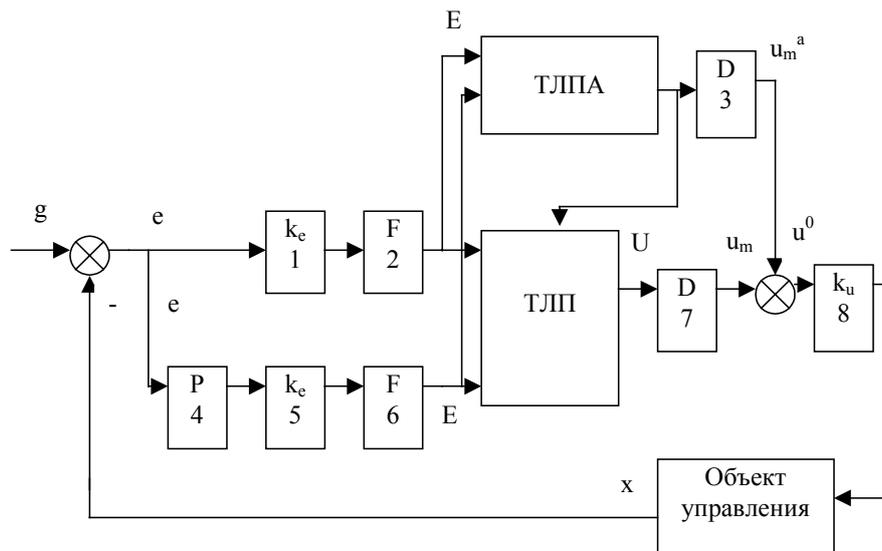


Рисунок. 2. Схема нечеткой адаптивной системы управления

На (рис. 2). блоки 1, 5, 8 выполняют функции масштабных элементов с коэффициентами  $k_e, k_u$ , блок 4 является дифференциатором, в элементах 2 и 6

происходит этап фаззификации входных значений, а элементах 3 и 7 – этап дефаззификации выходных управляющих воздействий.

Для разработки ТЛПА задается желаемый вид процесса управления. Необходимо отметить, что трудно представить точную траекторию желаемой реакции объекта управления, а иногда просто нецелесообразно предъявлять к проектируемой системе идеализированные жесткие требования. Эффективнее будет выделение некоторой допустимой области, внутри которой качество работы системы управления воспринималось бы как удовлетворительное и лишь при нарушении границ области применялись бы некоторые адаптирующие воздействия. Очень часто эксперт способен интуитивно выделять допустимую область, основываясь на своем опыте, а также из концептуальной модели о желаемой реакции объекта управления. Представим эти знания в виде лингвистических правил, в которых приняты следующие обозначения, (ПБ – положительное большое, ПМ – положительно малое, ОМ – очень малое, М – малое, МС – меньше среднего, С – среднее, БС – больше среднего, Б – большое) например:

- ЕСЛИ первое отклонение  $\Delta g^*$  ПБ И время регулирования  $t_p^*$  Б, ТО переходный процесс не удовлетворительный и необходима ОБ адаптация ИНАЧЕ\$

- ЕСЛИ первое отклонение  $\Delta g^*$  М И время регулирования  $t_p^*$  М, ТО переходный процесс удовлетворительный/

Функции принадлежности ЛП „отклонение” и ЛП „время регулирования” на (рис.3 -4).

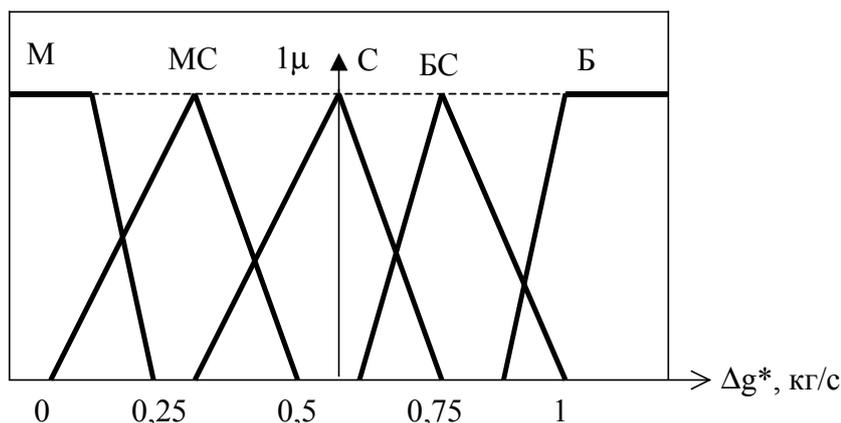


Рисунок.3 – Функции принадлежности ЛП „отклонение”

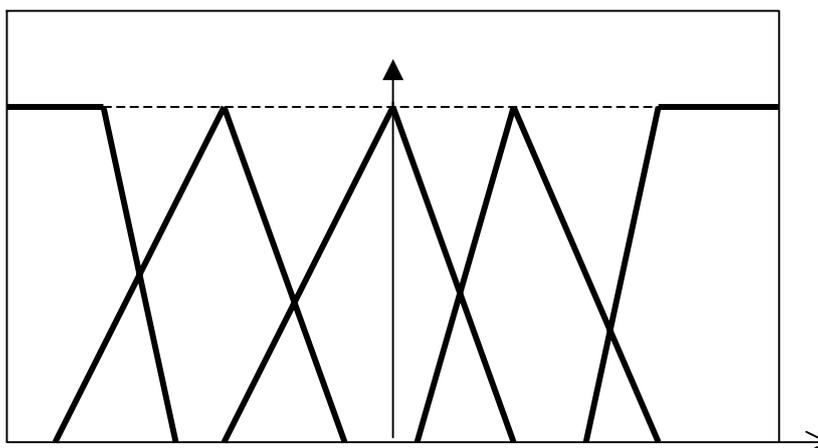


Рисунок 4 – Функции принадлежности ЛП „время регулирования”

Существует и другая методика, предложенная зарубежными учеными С. Ассилиани и Т. Просиком [3,4], например:

ЕСЛИ ошибка  $e^*$  ПБ, И скорость изменения ошибки  $e^{**}$  ПБ, ТО переходный процесс системы удовлетворительный и адаптация не нужна ИНАЧЕ,

ЕСЛИ ошибка  $e^*$  ПМ, И скорость изменения ошибки  $e^{**}$  ПБ, ТО переходный процесс системы неудовлетворительный и необходима отрицательно средняя адаптация управления  $u^a$ .

или

$$R_k^a = E_i \times E_j^* \times U_e^a, \quad (1)$$

$$i = \overline{1, n}, j = \overline{1, n}, e = \overline{1, n}, k = \overline{1, n}$$

где  $R_k^a$  – нечеткое описание правила в пространстве  $E_i \times E_j \times U_e^a$ ;  $E_i, E_j, U_e^a$  – соответственно, нечеткие подмножества ошибки, скорости изменения ошибки и адаптации управления.

Полученные нечеткие описания правил формируют матрицу нечетких отношений [2] (МНО):

$$R^a = R_1^a \vee R_2^a \vee \dots \vee R_k^a \vee \dots \vee R_{n4}^a, \quad k = \overline{1, n}. \quad (2)$$

Назначением матрицы  $R^a$  является выработка адаптирующего воздействия при выходе траектории переходного процесса за допустимые границы.:

Процедура синтеза нечеткого регулятора заключается в определении множества лингвистических правил управления и значений коэффициентов масштабирования  $k_e, k_e^*$  и  $k_u$ , обеспечивающих желаемое качество процесса управления, а для нечеткого адаптивного регулятора необходимо дополнительно определить множество лингвистических правил адаптации управления. Структура адаптивной системы управления предложенная Р.Алиевым и др. [4] предлагается к применению в условиях регулирования температуры в зоне подогрева печи.

Так как таблица лингвистических правил (ТЛП) основного контура и контура нечеткой адаптации имеют идентичные входы, то в нечетком адаптивном регуляторе рассматриваются четыре нечетких множества

$$E_i (i = \overline{1, 5}); E_j^* (j = \overline{1, 5}); U_1 (l = \overline{1, 5}); U_k^a (k = \overline{1, 5}). \quad (3)$$

где  $E_i, E_j^*, U_1, U_k^a$  - соответственно нечеткие множества ошибки, скорости изменения ошибки, управления и адаптации управления.

Как отмечалось выше, процедура адаптации управления заключается в корректировке некоторого правила из ТЛП основного контура регулятора, приведшего к текущей неудовлетворительной реакции объекта управления. Рассмотрим эту процедуру подробнее. Допустим, что некоторое правило из ТЛП основного контура явилось причиной текущего неудовлетворительного (по ТЛП контура нечеткой адаптации) выхода объекта.

Текущая неудовлетворительная реакция объекта была установлена некоторым правилом из ТЛП контура адаптации, нечеткое описание которого составляет матрицу

$$R_m^a = E_m \times E_m^* \times U_m^a. \quad (4)$$

где  $m$  – индекс текущего времени опроса (интервал дискретности 30 секунд).

Очевидно, что неудовлетворительное правило должно быть заменено скорректированным:

$$R' = E_{m-k} \times E_{m-k}^* \times U^H, \quad (5)$$

где  $U^H = F \{u_{m-k}^a + u_m^a\}$ ,  $k$  – индекс времени регулирования.

Таким образом, в ТЛП будет занесено новое правило, которое для текущих значений параметров объекта управления предпочтительнее. Для решения вопроса адаптации управления, соответствующего неудовлетворительному правилу,

представляется целесообразным использовать четкое значение  $U_n^a$  в соответствии со следующим алгоритмом:

$$u^0 = u_m + u_m^a, \quad (6)$$

где  $u_n = D \{U_m\}$ ;  $u_n^a = D \{U_m^a\}$ ;  $D$  – оператор перехода от нечеткой переменной к четкой (рис.5).

Указанные подмножества определены для соответствующих лингвистических термов:

$$\begin{aligned} U_1^* &= \text{OM} (u, \mu_1 (u)); \\ U_2^* &= \text{M} (u, \mu_2 (u)); \\ U_3^* &= \text{C} (u, \mu_3 (u)); \\ U_4^* &= \text{Б} (u, \mu_4 (u)); \\ U_5^* &= \text{ОБ} (u, \mu_5 (u)), \end{aligned} \quad (7)$$

где  $U_l^* (l=\overline{1,5})$  – лингвистический терм соответствующий лингвистической переменной нечеткого подмножества  $U_l$ ;

$\mu_l (u)$  – функция принадлежности нечеткого множества  $U_l$ .

Аналогичным образом на принятом языке определены нечеткие подмножества для скорости изменения ошибки:

$$E_j^* = (e_m^*, \mu_j (e_m^*)), \quad j = \overline{1,5}; \quad (8)$$

адаптации управления:

$$U_k^a = (u^a, \mu_k (u^a)), \quad k = \overline{1,5}; \quad (9)$$

ошибки управления:

$$E_i = (e_m, \mu_j (e_m)), \quad i = \overline{1,6}. \quad (10)$$

Число лингвистических термов ошибки больше количества других термов на один вследствие того, что для ошибки добавлены термы ОН (отрицательно ноль) и ПН (положительный ноль) вместо терма Н (нулевого) (рис.7).

В выражениях (8) – (10) масштабированные величины  $e_m$  и  $e_m^*$  определены следующим образом:

$$e_m = k_e e; \quad e_m^* = k_e e^*. \quad (11)$$

На (рис. 5-7). представлены пределы изменения ряда нечетких множеств и графики их функций принадлежности  $\mu_1 (u^0)$ ,  $\mu_k (u^a)$ ,  $\mu_j (e_m^*)$ ,  $\mu_i (e_m)$ , соответствующих управлению  $U_l (l = \overline{1,5})$ , адаптации управления  $U_k^a (k = \overline{1,5})$ , скорости изменения ошибки  $E_j^* (j = \overline{1,5})$ , ошибки  $E_i (i = \overline{1,7})$ .

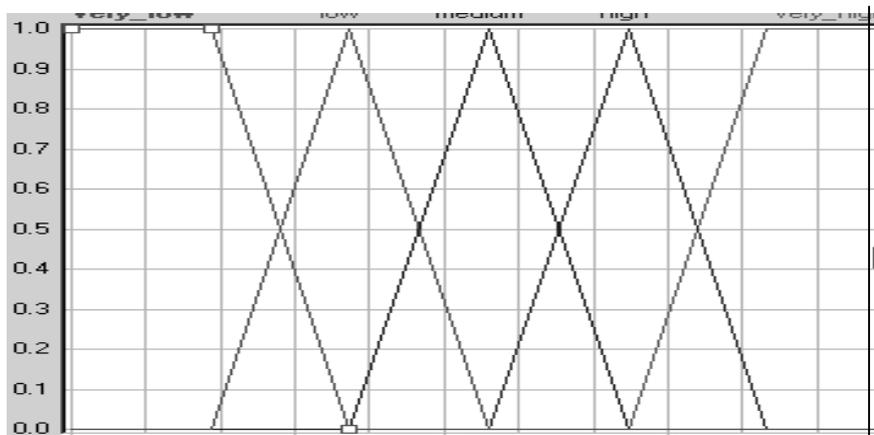


Рисунок 5 – Функции принадлежности лингвистической переменной „скорость изменение ошибки”

Введение дополнительных термов ОН и ПН в ЛП „ошибка управления” или „отклонение” способствует более точному нахождению степени истинности отклонения, введению новых правил в ТЛП и, соответственно, лучших показателей качества переходных процессов регулирования.

Разработанные таблицы лингвистических правил основного контура и ТЛПА контура адаптации представлены в (табл. 1-2).

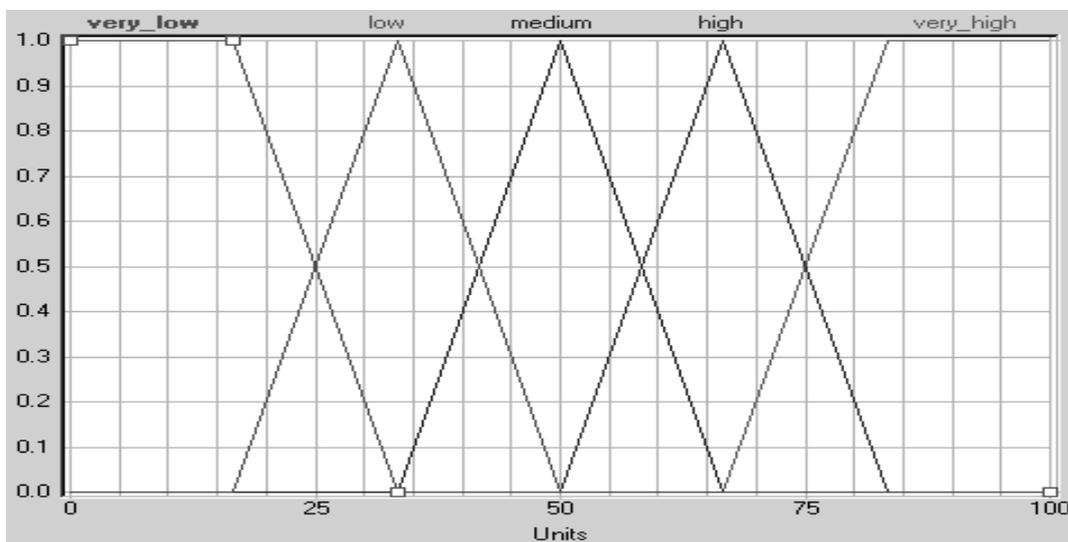


Рисунок 6 – Функции принадлежности лингвистической переменной „управляющее воздействие”

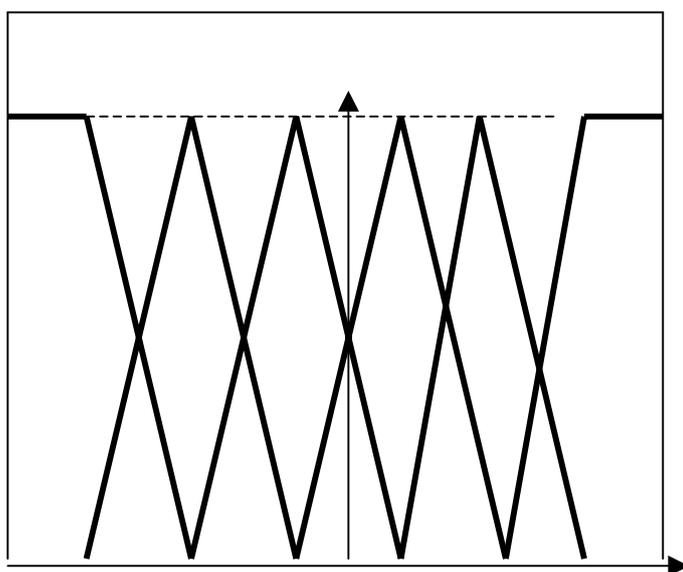


Рисунок 7 – Функции принадлежности лингвистической переменной „отклонение”

На рис. 7: ОБ - отрицательно большая, ОС – отрицательно средняя, ОН – отрицательно нулевая, ПН – положительно нулевая, ПС – положительно средняя, ПБ – положительно большая.

Таблица 1 – Таблица лингвистических правил по определению управляющего воздействия подачи газа на форсунку зоны подогрева

отклонение e(t)	производная от отклонения - e(t)*				
	ОМ	М	С	Б	ОБ
ОБ	С	С	С	Б	ОБ
ОС	С	С	С	ОБ	ОБ
ОН	М	С	С	С	Б
ПН	ОБ	С	С	С	Б
ПС	М	С	Б	ОБ	ОБ
ПБ	ОБ	ОБ	ОБ	ОМ	ОМ
Управляющее воздействие по отклонению u (t)					

Таблица 2 – Таблица лингвистических правил по определению адаптации управляющего воздействия подачи газа на форсунку зоны подогрева

отклонение e(t)	производная от отклонения - e(t)*				
	ОМ	М	С	Б	ОБ
ОБ	ОМ	ОМ	М	С	Б
ОС	М	М	С	С	Б
ОН	С	С	С	С	С
ПН	ОБ	С	С	С	Б
ПС	ОМ	ОМ	ОМ	С	С
ПБ	ОМ	ОМ	С	С	С
Адаптация управляющее воздействие по отклонению u <sup>a</sup> (t)					

Аналогичные ТЛП применимы для нечетких адаптивных регуляторов регулирующих температуру клинкера в зонах спекания и декарбонизации.

Для апробации предложенных моделей управления и сравнительного анализа качества управления нечеткой адаптивной системы и системы с типовыми регуляторами воспользуемся специализированным пакетом fuzzyTECH [5] (рис.8).

Информация о сигнале рассогласования (ошибке) и скорости ее изменения поступает в ТЛП1 (табл.1), выходом которой является управляющее воздействие (изменение процента хода регулирующего органа – газового клапана). Программа оснащена дополнительной адаптивной ТЛП2 (табл.2).

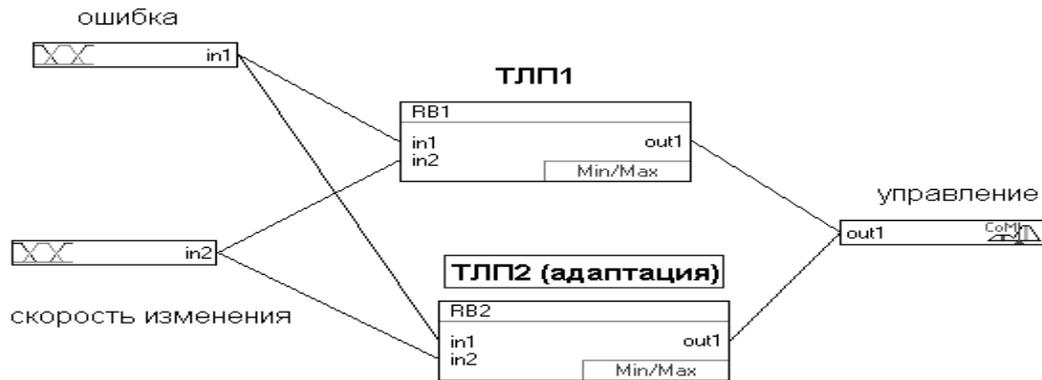


Рисунок 8 – Проект программы нечеткого адаптивного управления температурой клинкера в зоне подогрева, выполненной в пакете fuzzyTECH

Представленная программа отражает структуру нечеткой адаптивной системы (рис.2). Информация о сигнале рассогласования и скорости его изменения поступает одновременно в ТЛП1 (основного контура) и ТЛП 2 (адаптивного). Управляющие правила представлены в таблицах (табл.1 – 2). С помощью ТЛП 2 производится оценка качества переходного процесса и коррекция правил ТЛП1.

Апробация разработанных систем управления в специализированном пакете fuzzyTECH и сравнительный анализ переходных процессов позволяет прийти к заключению о преимуществе нечеткой адаптивной АСР.

В связи с проведенным обзором научных работ и апробацией нечеткой адаптивной системы можно отметить, что значительное изменение значений параметров объекта управления влечет за собой модификацию управляющих правил в ТЛП, что успешно производит адаптивный контур (ТЛПА) и, соответственно, такая корректировка позволяет получить выходной продукт заданного качества не зависимо от значительных изменений состояния объекта управления.

## Список литературы

1. Инцелев Р.И., Кацман А.Д., В.С. Шидлович. Автоматизированное управление обжигом при производстве цемента.-Л.:Стройиздат,1988.-152с.
2. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений . – М.: Мир, 1976 . – 289 с.
3. Алиев Р.А., Церковный А.Э., Мамедова Г.А. Управление производством при нечеткой исходной информации. М.: Энергоиздат. 1991. – 234 с.
4. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта/ Под.Ред. Д.А. Поспелова – М.: Радио и связь, 1982. . – 490 с.
5. Леоненков А. Ю. Нечеткое моделирование в среде Matlab и fuzzyTech. – С. - Птб.: БХВ, 2003. – 720 с.

В статті запропонована структура адаптивної системи керування випалом клінкера в печі, яка функціонує по нечіткому алгоритму.

In the article the structure of the adaptive control system by burning of clinker in stoves is offered functioning on an unclear algorithm.