

# ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ УЗЛА “ТЕМПЕРАТУРА ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ” НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКИХ ДИАГРАММ ПОВЕДЕНИЯ В СОВЕТУЮЩЕЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ЦЕМЕНТНОЙ ПЕЧЬЮ

---

*valerymag@nm.ru*

**Ващенко Р.А., аспирант,  
Степовой А.А., аспирант,  
Бажанов А.Г., канд. техн. наук, доц.,  
Магергут В.З., д-р техн. наук, проф.**  
*Белгородский государственный технологический  
университет им. В. Г. Шухова*

**Аннотация.** Рассматривается построение модели функционирования узла цементной печи “Температура отходящих газов” в виде нечеткой диаграммы поведения. Предлагается применить методику построения модели с использованием fuzzy-подхода, совмещенного с нечеткими диаграммами поведения узлов. Приведены способы адаптации функций принадлежности с помощью нейронных сетей. Полученная модель необходима для разработки логической структуры управления печью, реализации совокупной работы всех узлов печного агрегата в рамках создания советующей системы управления вращающейся печью.

**Ключевые слова:** цементная печь, узел, нечеткая диаграмма поведения, технологические условия, технологическая структура, нейронная сеть, нечеткая кластеризация, функция принадлежности, сглаживание.

**Введение.** Комплекс процессов, происходящих во вращающихся печах под воздействием тепловой энергии, весьма обширен и сложен. Процессы горения топлива, движения газов и материала, теплообмена и физико-химических превращений сырьевой смеси тесно связаны между собой [1].

Трудности эксплуатации печного агрегата связаны со сложностью поддержания оптимальных показателей и параметров технологического процесса, сложностью их описания в виде дифференциальных уравнений, ввиду трудно структурируемой физико-химической динамики объекта.

Кроме того, управление печью осложняется наличием в сигналах с датчиков помех различного вида: шумы, импульсные помехи, наводки. Погрешности - шумы возникают в контролируемом объекте вследствие несовершенства существующих измерительных преобразователей, случайного характера происходящих в них процессов, и в самих датчиках, в электронных каналах приборов. К наводкам можно отнести внешние радиопомехи, изменения условий окружающей среды и т.д. [2-4]. Импульсные помехи представляют собой аperiodические выбросы малой длительности, моменты появления которых, их полярность и амплитуда носят случайный характер.

Возникает задача обработки цифрового сигнала. Еще более чувствительны к решению данной задачи интеллектуальные алгоритмы управления. Поэтому разрабатываемая советующая система управления вращающейся цементной печью нуждается в дополнении подсистемой обработки входных сигналов.

Учитывая вышеназванные сложности, для создания автоматизированных систем управления целесообразно использовать ввод нечеткости в управляющие и управляемые технологические величины с использованием fuzzy-подхода, совмещенного с построением нечетких диаграмм поведения технологических величин (узлов) цементной печи [5].

**Основная часть.** В данной работе описывается построение и использование модели узла «Температура отходящих газов», используя методику, предложенную в [6].

«Подготовка» материала в холодной части печи в основном контролируется по следующим технологическим величинам: температуре отходящих газов, разрежению за обрезом печи, температуре в зоне подогрева, температуре в зоне сушки. При налаженной работе печи с минимальным расходом топлива колебания температуры отходящих газов не выходят за пределы  $\pm 2,5^{\circ}\text{C}$ . В то же время работа печи с большими колебаниями температуры отходящих газов без «тихих ходов» говорит о протекании процесса обжига с определенным избытком топлива. Таким образом, нормальная работа узла «Температура отходящих газов» является показателем обеспечения оптимального режима работы печи и позволяет предотвратить нарушения технологического процесса. Все это говорит о важности данного узла для построения советующих систем управления печью.

Структура узла «Температура отходящих газов» может быть представлена в виде «черного ящика», как на рис. 1.

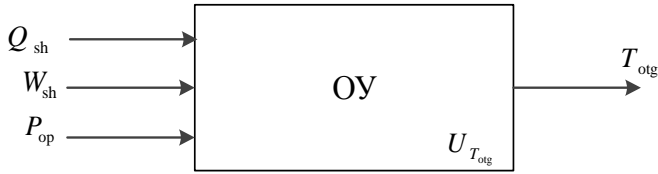


Рисунок 1 – Структура узла “Температура отходящих газов”  $U_{T_{отг}}$

На узел влияют три основные величины:  $Q_{sh}$  – расход шлама,  $P_{op}$  – разрежение за обрезом печи,  $W_{sh}$  – влажность сырья.

Перед разбиением входных величин ( $Q_{sh}$ ,  $P_{op}$ ,  $W_{sh}$ ) по значениям нечетких градаций, необходимо произвести сглаживание данных сигналов для устранения влияния помех на работу модели. Для этого воспользуемся алгоритмом, описанным в работе [7]. Суть метода состоит в прогнозе будущих значений технологической величины и последующей их аппроксимации полиномом  $k$ -й степени. Его применение позволит повысить точность и адекватность определения режима работы выходной технологической величины  $U_{T_{отг}}$ .

Разделение входных величин по нечетким градациям значений:

1. Подача (расход) шлама в печь  $Q_{sh}$  (т/ч), которую определяет процент открытия шиберов шлама  $z_{sh}$  (%). Степень открытия шиберов и расход шлама определим тремя термами, соответственно: малый ( $z_{sh}^m$ ), средний ( $z_{sh}^{sr}$ ) и большой ( $z_{sh}^b$ ); малый ( $Q_{sh}^m$ ), средний ( $Q_{sh}^{sr}$ ) и большой ( $Q_{sh}^b$ );

2. Разрежение за обрезом печи  $P_{op}$  (мм. вод. ст.), которое зависит от процента открытия шиберов дымососов  $z_{d1}$  и  $z_{d2}$  (%). Запишем их в виде следующих термов: малый ( $P_{op}^m$ ), средний ( $P_{op}^{sr}$ ) и большой ( $P_{op}^b$ ); малый ( $z_{d1}^m$ ), средний ( $z_{d1}^{sr}$ ), большой ( $z_{d1}^b$ ); малый ( $z_{d2}^m$ ), средний ( $z_{d2}^{sr}$ ) и большой ( $z_{d2}^b$ ).

3. Влажность сырья  $W_{sh}$  (проц.): низкая ( $W_{sh}^m$ ), нормальная ( $W_{sh}^{sr}$ ), высокая ( $W_{sh}^b$ ).

С учетом введенных обозначений и по результатам теоретических исследований, а также в соответствии с мнениями инженера по обжигу (ЗАО “Осколцемент”), отвечающего за производство клинкера, и операторов печи, построены следующие функции принадлежности входных величин узла  $U_{T_{отг}}$  (рис. 2).

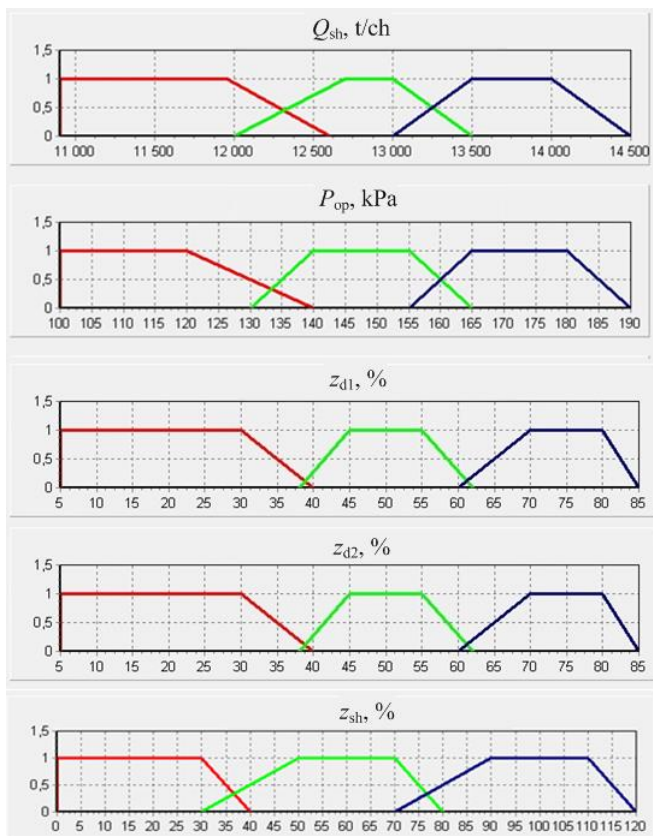


Рисунок 2 – Функции принадлежности узла  
 “Температура отходящих газов”  $U_{T_{ог}}$

Поскольку вид и параметры функций принадлежности выбираются субъективно, они могут быть не вполне адекватны реальной действительности.

Для устранения указанного недостатка производят объединение подходов на основе нечеткой логики и нейронных сетей. В нашем случае реализация объединения рассмотренных двух подходов выливается (сводится к построению) в гибридную нейросетевую нечеткую систему, в которой нейросеть используется как инструмент в нечеткой системе [8]. А именно - осуществляется вывод по управлению печью на основе нечетких диаграмм поведения в основе которых лежат

функции принадлежности, параметры которых настраиваются с использованием алгоритмов обучения нейронных сетей (НС).

При этом возникает две задачи:

- первичный подбор функций принадлежности;
- оптимальное уточнение функций принадлежности на обучающих данных.

Для решения первой задачи воспользуемся методом нечеткой кластеризации экспериментальных данных, например, алгоритмом нечеткой самоорганизации C-means [9-10]. При нечеткой кластеризации каждый объект может принадлежать всем кластерам, но с разной степенью. Если объект описывается только одним признаком, тогда предлагается сопоставить нечеткий кластер нечеткому множеству. При этом функция принадлежности нечеткого кластера будет соответствовать искомой функции принадлежности нечеткого множества.

Для решения второй задачи необходимо реализовать функции принадлежности с помощью нейронных сетей. Воспользуемся способом описанном в [8]. Рассмотрим возможность построения функций принадлежности для трех значений некоторой лингвистической переменной: «мало (S - Small)», «средне (M- Medium)», «много (L - Large)».

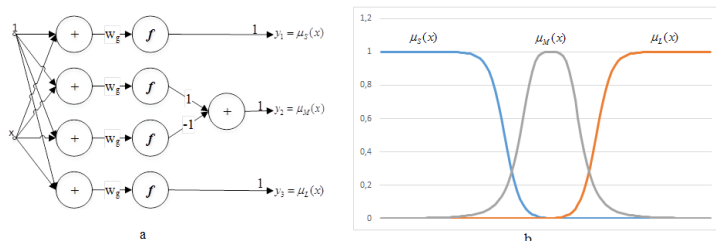


Рисунок 3 – Нейросетевая реализация функций принадлежности:  
а – структура НС; б – график функций принадлежности

Для этого используем НС, представленную на рис. 3, а. На этом рисунке выходы  $y_1$ ,  $y_2$ ,  $y_3$  определяют величины соответствующих функций принадлежности.

Узлы со знаком “+” суммируют сигналы входов нейронов, а узлы с символом f реализуют сигмоидальные функции. Например, для значения лингвистической переменной «мало» функцию принадлежности можно определить с помощью формулы (1).

$$y_1 = \mu_s(x) = \frac{1}{1 + e^{-w_g(x+w_c)}}, \quad (1)$$

где  $w_c$  - весовой коэффициент для смещения и  $w_g$  - вес суммарного сигнала на входе нелинейного преобразователя. Путем подстройки весовых коэффициентов формируются функции принадлежности (рис. 3, б).

Благодаря уточнению функций принадлежности удается улучшить модуль нечеткого управления.

Составим управляющие и возмущающие технологические условия. Управляющие технологические условия – независимые внешние факторы, которые при определенных условиях самостоятельно могут изменять параметры объекта или состояния управляющих технологических величин без вмешательства управляющих воздействий посредством исполнительных устройств. Возмущающие технологические условия создают непосредственное возмущение на выходные технологические величины объекта.

Управляющие технологические условия для наличия шлама  $\mathcal{G}_1$ , клапана подачи шлама  $\mathcal{G}_2$  и исправности дымососов отходящих газов  $\mathcal{G}_3, \mathcal{G}_4$  запишем в виде:

$$\mathcal{G}_1 = \begin{cases} 1 - \text{если есть шлам } (F_{sh}), \\ 0 - \text{если иначе;} \end{cases}$$

$$\mathcal{G}_2 = \begin{cases} 1 - \text{если клапан подачи шлама открыт } (R_{ksh}), \\ 0 - \text{если иначе;} \end{cases}$$

$$\mathcal{G}_3 = \begin{cases} 1 - \text{исправен дымосос отходящих газов } (F_{dd1}), \\ 0 - \text{если иначе;} \end{cases}$$

$$\mathcal{G}_4 = \begin{cases} 1 - \text{исправен дымосос отходящих газов } (F_{dd2}), \\ 0 - \text{если иначе;} \end{cases}$$

где  $F_{sh}$  – флаг наличия шлама на входе в печь (1 – есть, 0 – нет),  $R_{ksh}$  – флаг состояния клапана шлама (1 – открыт, 0 – закрыт),  $F_{dd1}$  – исправность дымососа 1 (1 – исправен, 0 – иначе),  $F_{dd2}$  – исправность дымососа 2 (1 – исправен, 0 – иначе).

Возмущающие технологические условия для величин – расход шлама  $Q_{sh}$ , разрежение за обрезом печи  $P_{op}$ , влажность сырья  $W_{sh}$  запишем в виде:

Расход шлама  $Q_{sh}$ :

$$V1 = \begin{cases} g11 = \begin{cases} 1 - \text{если } Q_{sh} \in Q_{sh}^{sh_m}, \\ 0 - \text{если } Q_{sh}^{sh_m} < Q_{sh} < Q_{sh}^{sh_{sr}}, \end{cases} \\ g12 = \begin{cases} 1 - \text{если } Q_{sh} \in Q_{sh}^{sh_{sr}}, \\ 0 - \text{если } Q_{sh}^{sh_{sr}} < Q_{sh} < Q_{sh}^{sh_b}, \end{cases} \\ g13 = \begin{cases} 1 - \text{если } Q_{sh} \in Q_b, \\ 0 - \text{если иначе,} \end{cases} \end{cases}$$

где  $Q_{sh}^{sh_m}$  – малый расход шлама,  $Q_{sh}^{sh_{sr}}$  – средний (норма) расход шлама,  $Q_{sh}^{sh_b}$  – большой расход шлама;

Разрежение за обрезом печи  $P_{op}$ :

$$V2 = \begin{cases} g21 = \begin{cases} 1 - \text{если } P_{op} \in P_{op}^{op_m}, \\ 0 - \text{если } P_{op}^{op_m} < P_{op} < P_{op}^{op_{sr}}, \end{cases} \\ g22 = \begin{cases} 1 - \text{если } P_{op} \in P_{op}^{op_{sr}}, \\ 0 - \text{если } P_{op}^{op_{sr}} < P_{op} < P_{op}^{op_b}, \end{cases} \\ g23 = \begin{cases} 1 - \text{если } P_{op} \in P_{op}^{op_b}, \\ 0 - \text{если иначе,} \end{cases} \end{cases}$$

где  $P_{op}^{op_m}$  – малое (низкое) разрежение,  $P_{op}^{op_{sr}}$  – среднее (норма) разрежение,  $P_{op}^{op_b}$  – большое разрежение;

Влажность сырья  $W_{sh}$ :

$$V3 = \begin{cases} g31 = \begin{cases} 1 - \text{если } W_{sh} \in W_{sh}^{sh_m}, \\ 0 - \text{если } W_{sh}^{sh_m} < W_{sh} < W_{sh}^{sh_{sr}}, \end{cases} \\ g32 = \begin{cases} 1 - \text{если } W_{sh} \in W_{sh}^{sh_{sr}}, \\ 0 - \text{если } W_{sh}^{sh_{sr}} < W_{sh} < W_{sh}^{sh_b}, \end{cases} \\ g33 = \begin{cases} 1 - \text{если } W_{sh} \in W_b, \\ 0 - \text{если иначе,} \end{cases} \end{cases}$$

где  $W_m^{sh}$  – низкая влажность,  $W_{sr}^{sh}$  – нормальная влажность,  $W_b^{sh}$  – высокая влажность.

В соответствии с управляющими и возмущающими технологическими условиями строится технологическая структура узла “Температура отходящих газов” (рис. 4).

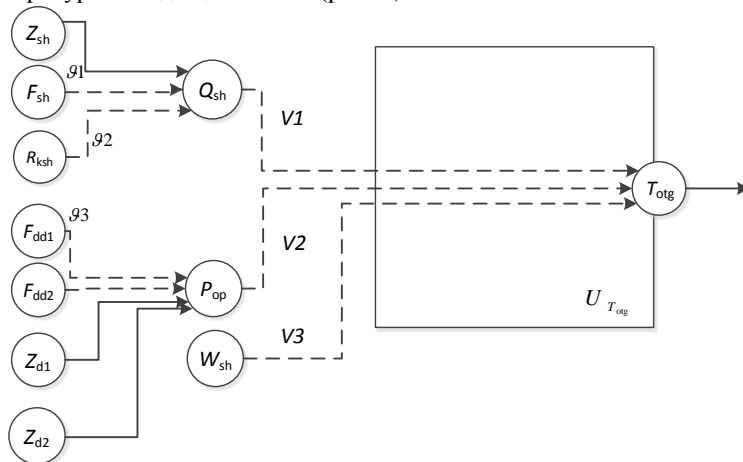


Рисунок 4 – Технологическая структура узла “Температура отходящих газов”  $U_{T_{otg}}$

- > Влияние степени открытия шибера подачи шлама и шибера дымососов;
- -> Влияние управляющих технологических условий.

Построив структуру узла, переходим к построению нечеткой диаграммы поведения узла 1-го ранга (рис. 5), в которой вершины (1 – 3) соответствуют нечетким статическим режимам, а (4 – 11) – динамическим режимам работы печи. В данном случае непрерывное поведение технологической величины заменяется её дискретным поведением в виде режимов [11], представляющих собой элементарную часть (участок) переходного процесса, происходящего в объекте. При этом в нечетких диаграммах поведения узлов режим характеризуется функциями принадлежности.



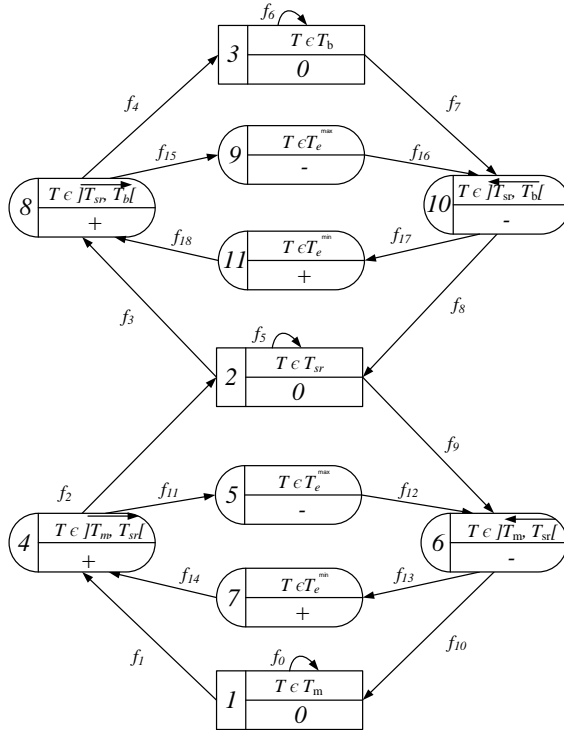


Рисунок 5 – Нечеткая диаграмма поведения узла  
 “Температура отходящих газов”  $U_{T_{отг}}$

На диаграмме:  $T = T_{отг}$ ,  $T_m$  – малое значение температуры отходящих газов,  $T_{sr}$  – среднее (нормальное) значение температуры отходящих газов,  $T_b$  – высокое (большое) значение температуры отходящих газов. Обозначение интервала изменения температуры отходящих газов, записывается как  $T \in ]T_m, T_{sr}[$ , где стрелка показывает направление изменения температуры, при этом  $T \in T_e^{\max}$  – область экстремума: максимума или минимума ( $T \in T_e^{\min}$ ), из соответствующего интервала температуры.

Овальные вершины графа (4-11) соответствуют нечетким динамическим режимам узла, то есть нечетким графикам изменения  $T_{\text{отг}}$  на заданном интервале, а прямоугольные вершины (1-3) – нечетким статическим ее значениям, что показано над чертой в соответствующей вершине, а под чертой дан знак первой производной  $T_{\text{отг}}$ . Таким образом, поскольку учитывается знак лишь первой производной, построена диаграмма поведения узла  $T_{\text{отг}}$  первого ранга.

Смысла учитывать знак второй производной, то есть строить диаграмму поведения узла второго ранга, нет, так как изменение температуры отходящих газов происходит достаточно плавно, без резких колебаний.

Введя функцию  $Q_1 = \mathcal{G}_1 \wedge \mathcal{G}_2 \wedge \mathcal{G}_3 \wedge \mathcal{G}_4$ , условия перехода  $f_i$ , можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned}
 f_0 &= \overline{Q_1} \vee (Q_1 \vee ((\mathcal{G}_{13} \wedge \mathcal{G}_{21} \wedge \mathcal{G}_{31}) \wedge (z_m^{d1} \wedge z_m^{d2}))) \\
 f_1 &= Q_1 \wedge ((\mathcal{G}_{12} \wedge \mathcal{G}_{11}) \wedge (\mathcal{G}_{22} \wedge \mathcal{G}_{23}) \wedge (\mathcal{G}_{32} \wedge \mathcal{G}_{33}) \wedge ((z_{sr}^{d1} \vee z_b^{d1}) \wedge (z_{sr}^{d2} \vee z_b^{d2}))); \\
 f_2 &= Q_1 \wedge ((\mathcal{G}_{12} \wedge \mathcal{G}_{11}) \wedge (\mathcal{G}_{22} \wedge \mathcal{G}_{23}) \wedge (\mathcal{G}_{32} \wedge \mathcal{G}_{33}) \wedge ((z_{sr}^{d1} \vee z_b^{d1}) \wedge (z_{sr}^{d2} \vee z_b^{d2}))); \\
 f_{12} &= f_9; f_{13} = f_7; f_{14} = f_3; f_{10} = f_0; f_{11} = f_9; f_{13} = f_1; f_{14} = f_1; f_{15} = f_7; \\
 f_{16} &= f_7; f_{17} = f_3; f_{18} = f_3 \\
 f_5 &= Q_1 \wedge \mathcal{G}_{12} \wedge \mathcal{G}_{22} \wedge \mathcal{G}_{32} \wedge z_{sr}^{d1} \wedge z_{sr}^{d2}; \\
 f_3 &= Q_1 \wedge ((\mathcal{G}_{13} \wedge \mathcal{G}_{23} \wedge \mathcal{G}_{33}) \wedge (z_b^{d1} \wedge z_b^{d2})); \\
 f_4 &= Q_1 \wedge ((\mathcal{G}_{13} \wedge \mathcal{G}_{23} \wedge \mathcal{G}_{33}) \wedge (z_b^{d1} \wedge z_b^{d2})); \\
 f_6 &= Q_1 \wedge \mathcal{G}_{11} \wedge \mathcal{G}_{23} \wedge \mathcal{G}_{23} \wedge \mathcal{G}_{33} \wedge z_b^{d1} \wedge z_b^{d2}; \\
 f_7 &= f_0 \vee ((\mathcal{G}_{12} \wedge \mathcal{G}_{13}) \wedge (\mathcal{G}_{22} \wedge \mathcal{G}_{21}) \wedge (\mathcal{G}_{32} \wedge \mathcal{G}_{31}) \wedge ((z_{sr}^{d1} \vee z_m^{d1}) \wedge (z_{sr}^{d2} \vee z_m^{d2}))); \\
 f_8 &= (f_0 \vee ((\mathcal{G}_{12} \wedge \mathcal{G}_{13}) \wedge (\mathcal{G}_{22} \wedge \mathcal{G}_{21}) \wedge (\mathcal{G}_{32} \wedge \mathcal{G}_{31}) \wedge ((z_{sr}^{d1} \vee z_m^{d1}) \wedge (z_{sr}^{d2} \vee z_m^{d2})))) \vee (Q_1 \wedge \mathcal{G}_{12} \wedge \\
 &\mathcal{G}_{22} \wedge z_{sr}^{d1} \wedge z_{sr}^{d2}); \\
 f_9 &= f_0 \vee (\mathcal{G}_{13} \wedge \mathcal{G}_{21} \wedge \mathcal{G}_{31} \wedge (z_m^{d1} \wedge z_m^{d2})).
 \end{aligned}$$

Используя полученную нечеткую диаграмму поведения, можно записать очередность переходов от одного режима работы к другому в виде последовательности операций нормального хода процесса и возможных появлений нештатных ситуаций. Данную конструкцию назовем разверткой работы узла “Температура отходящих газов”. Она показана на рис. 6. По развертке можно отследить нормальную работу технологической величины, выявить возникновение нештатных

ситуаций, а также выявить взаимосвязи работы данного узла с другими (при их наличии).

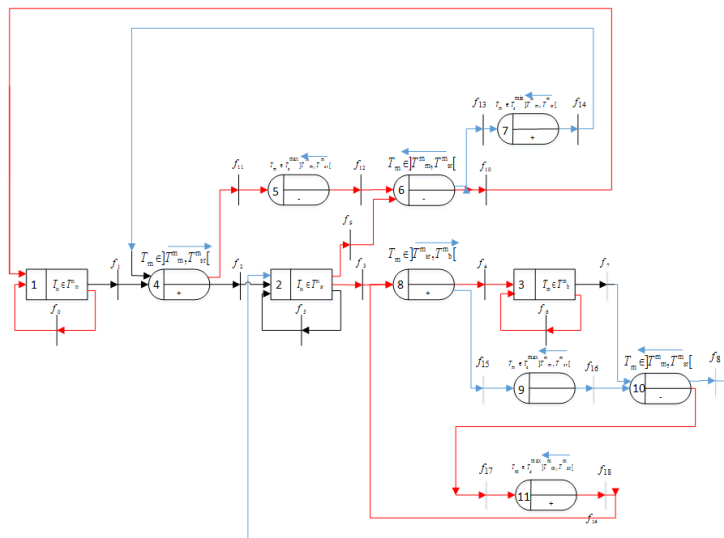


Рисунок 6 – Развертка для узла “Температура отходящих газов”  $U_{T_{ог}}$

→ Возникновение нештатных ситуаций.

Именно на основе разверток всех исследованных узлов вращающейся печи разрабатывается логическая структура управления агрегата, включающая в себя межузловые связи и комплексную работу всех узлов.

Реализация алгоритма совместной работы узлов для советующей системы заключается в получении продукционных правил, которые позволяют советующей системе определить режим работы цементной печи и оценить состояние технологического процесса.

Особенностью нечетких диаграмм поведения является то, что они позволяют сформулировать продукционные правила двумя способами [12]:

1. Традиционного в виде конструкции типа “ЕСЛИ – ТО”;

При таком способе правила формулируются следующим образом: «ЕСЛИ имеется то или иное условие, ТО необходимо совершить действие». В данном случае при такой формулировке продукционных

правил ЦЕЛЬ в явном виде не фигурирует, хотя ЦЕЛЬ правила можно домыслить и записать так: «ЕСЛИ имеется то или иное условие, ТО необходимо совершить действие, И тогда достигается ЦЕЛЬ»

2. В виде конструкции “ЧТОБЫ – ПРИ – НУЖНО”, отражающей целеполагание правил, то есть «ЧТОБЫ достигалась ЦЕЛЬ, например, j-я выходная технологическая величина находилась в заданных пределах, ПРИ соответствующих условиях, например, заданных технологических условиях и возмущающих воздействиях НУЖНО совершить необходимое управляющее воздействие». Иначе, при применении связки «ЧТОБЫ-ПРИ-НУЖНО» мы получаем производственные правила по достижению ЦЕЛИ при определенных УСЛОВИЯХ путем совершения ДЕЙСТВИЙ, в нашем случае посредством управляющих воздействий и технологических условий [13].

Следовательно, в виду большей информативности и понятности для пользователя производственных правил конструкции «ЧТОБЫ-ПРИ-НУЖНО» предполагается их использовать при разработке алгоритма совместной работы узлов вращающейся цементной печи.

**Заключение.** Применив методику построения нечетких диаграмм поведения, создана модель функционирования узла “Температура отходящих газов”. Рассмотрены основные трудности, возникающие при разработке модели. В первую очередь, это проблема обработки входных сигналов, ввиду их сильной зашумленности и проблема выбора вида и параметров функций принадлежности. Для их решения разработаны специальные алгоритмы, которые позволяют повысить точность и адекватность.

**Вывод.** Полученная модель узла “Температура отходящих газов” в виде нечеткой диаграммы поведения является одним из элементов необходимым для создания советующей системы управления цементной печью. При этом дополнение модели алгоритмами сглаживания и нейросетевой адаптации функций принадлежности, позволит улучшить эффективность работы разрабатываемой советующей системы управления печью.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта №14-41-08016 «р\_офи\_м», с использованием оборудования ЦВТ БГТУ им. В.Г. Шухова.*

### Список литературы:

1. Древицкий Е.Г., Добровольский А.Г., Коробок А.А. Повышение эффективности работы вращающихся печей. М.: Стройиздат, 1990. 224 с.
2. Олссон Г., Пиани Д. Цифровые системы автоматизации и управления. СПб.: Невский диалект, 2001. 557 с.
3. Коротчаев В.В. Точность измерительных оптико-электронных приборов и систем: учеб. пособие. СПб.: НИУ ИТМО, 2011. 41 с.
4. Халимон В.И., Комаров П.И., Жуковец Ю.Э. Автоматизированный выбор программного фильтра: методические указания к лабораторной работе. СПб.: СПбГТИ(ТУ). Каф. систем автоматизированного проектирования и управления, 1999. 35 с.
5. Магергут В.З., Юдин Д.А., Бажанов А.Г., Порхало В.А., Копылов А.С., Степовой А.А., Ващенко Р.А. Интеллектуальная советующая система управления цементными вращающимися печами с применением технического зрения // Мир цемента. 2013. №2. С. 51–59.
6. Бажанов А.Г., Ващенко Р.А., Магергут В.З. Нечеткие диаграммы поведения узлов для сложных технологических объектов, принципы их построения и использования // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2014. №9. С. 26–34.
7. Степовой А.А., Магергут В.З. Сглаживание и прогнозирование входных данных для советующей системы управления вращающейся цементной печью // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2015. №6. С. 222–226.
8. Комарцова Л.Г., Максимов А.В. Нейрокомпьютеры. М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 400 с.
9. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / Пер. с польского И.Д. Рудинского. М.: Финансы и статистика, 2002. 344 с.
10. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М.: Горячая линия-Телеком, 2007. 288 с.
11. Магергут В.З., Юдицкий С.А., Перов В.Л. Построение логических моделей химико-технологических объектов (первичные и исходные модели). М.: МХТИ им. Д.И. Менделеева. 1988. 80 с.
12. Магергут В.З., Бажанов А.Г., Ващенко Р.А., Развитие аппарата производственных правил управления объектами с использованием диаграмм поведения узлов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2014. №9. С. 35–41
13. Magergut V.Z., Bazhanov A.G., Vashchenko R.A. Algorithmic Approaches to Synthesis Fuzzy Control Systems for Objects with Continuous Technology // World Applied Sciences Journal. 2013. №10. pp. 1291-1295.