

МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ УЗЛОВ ЦЕМЕНТНОЙ ПЕЧИ – «ТЕМПЕРАТУРА ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ» И «ТЕМПЕРАТУРА МАТЕРИАЛА В ЗОНЕ СУШКИ» В ВИДЕ НЕЧЕТКИХ ДИАГРАММ ПОВЕДЕНИЯ

valerymag@nm.ru

**Ващенко Р.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: Низкий уровень автоматизации цементных вращающихся печей, работающих по мокрому способу производства, сказывается на качестве выпускаемой продукции и энергетических затратах. Учитывая это, в данной статье описывается процесс построения моделей технологических величин (узлов). Для их создания предлагается использовать методику построения моделей с использованием fuzzy-подхода, совмещенного с нечеткими диаграммами поведения узлов. Разработанные модели необходимы для создания советующей системы управления вращающейся печью обжига, использование которой позволит определить режим работы печи обжига, выявить различные нештатные и аварийные ситуации, повысить производительность, снизить нагрузки на оператора.

Ключевые слова: цементная печь, узел, нечеткая диаграмма поведения, технологические условия, функции принадлежности, производционные правила.

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].

Возникает достаточно большое количество трудностей при эксплуатации печного агрегата. К ним можно отнести проблемы поддержания оптимальных показателей и параметров технологического процесса, сложность их описания в виде дифференциальных уравнений, ввиду трудно структурируемой физико-химической динамики объекта.

Поэтому 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 [2]. Непрерывное поведение технологической величины заменяется ее дискретным поведением в виде режимов, представляющих собой элементарную часть переходного процесса, происходящего в объекте. Такой подход является исследованием технологических процессов «снизу» и позволяет производить их детальное изучение [3].

В данной работе описывается построение двух узлов цементной печи «Температура отходящих газов» и «Температура материала в зоне сушки», используя методику, предложенную в [4].

«Подготовка» материала в зоне сушки в основном контролируется по двум параметрам: температуре отходящих газов и разрежению за обрезом печи и дополнительно – по температуре материала в зоне подогрева. При налаженной работе печи с минимальным расходом топлива колебания температуры отходящих газов не должны выходить за пределы $\pm 2,5^{\circ}\text{C}$. Следовательно, возможность работы печи с большими колебаниями температуры отходящих газов без «тихих ходов» говорит о протекании процесса обжига с некоторым избытком топлива. Таким образом, рассматриваемые величины, «Температура отходящих газов» и «Температура материала в зоне сушки», вносят существенный вклад для обеспечения оптимального режима работы, а их контроль позволяет предотвратить нарушения технологического процесса [5].

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

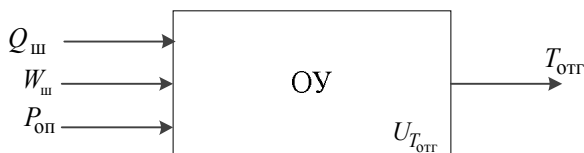


Рисунок 1 – Структура узла «Температура отходящих газов» $U_{T_{отг}}$

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

Разделение величин по нечетким градациям значений:

1. Подача (расход) шлама в печь $Q_{ш}$ (т/ч), которую определяет процент открытия шиберов шлама $z_{ш}$ (%). Степень открытия шиберов и

расход шлама определим тремя термами, соответственно: малый ($z_{\text{м}}^{\text{ш}}$), средний ($z_{\text{ср}}^{\text{ш}}$) и большой ($z_{\text{б}}^{\text{ш}}$); малый ($Q_{\text{м}}^{\text{ш}}$), средний ($Q_{\text{ср}}^{\text{ш}}$) и большой ($Q_{\text{б}}^{\text{ш}}$);

2. Разрежение за обрезом печи $P_{\text{оп}}$ (мм. вод. ст.), которое зависит от процента открытия шиберов дымососов $z_{\text{д1}}$ и $z_{\text{д2}}$ (%). Запишем их в виде следующих термов: малый ($P_{\text{м}}^{\text{оп}}$), средний ($P_{\text{ср}}^{\text{оп}}$) и большой ($P_{\text{б}}^{\text{оп}}$); малый ($z_{\text{м}}^{\text{д1}}$), средний ($z_{\text{ср}}^{\text{д1}}$), большой ($z_{\text{б}}^{\text{д1}}$); малый ($z_{\text{м}}^{\text{д2}}$), средний ($z_{\text{ср}}^{\text{д2}}$) и большой ($z_{\text{б}}^{\text{д2}}$).

3. Влажность сырья $W_{\text{ш}}$ (проц.): низкая ($I_{\text{м}}^{\text{ш}}$), нормальная ($I_{\text{ср}}^{\text{ш}}$), высокая ($I_{\text{б}}^{\text{ш}}$).

С учетом введенных обозначений и по результатам теоретических исследований, а также в соответствии с мнениями эксперта–технолога, отвечающего за производство клинкера, и операторов печи, построены следующие функции принадлежности узла $U_{T_{\text{отг}}}$ (рис. 2).

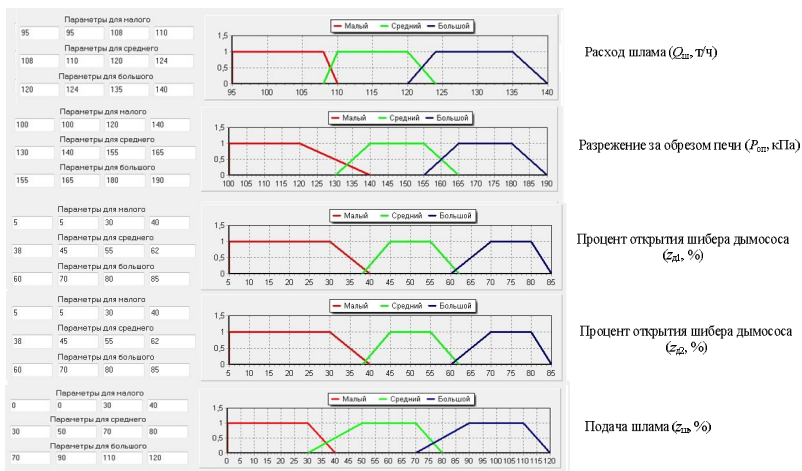


Рисунок 2 – Функции принадлежности узла «Температура отходящих газов»

Составим управляющие и возмущающие технологические условия. Управляющие технологические условия для наличия шлама 91, клапана подачи шлама 92 и исправности дымососов отходящих газов 93, 94 запишем в виде:

$$g_1 = \begin{cases} 1 - \text{если есть шлам } (F_{\text{ш}}), \\ 0 - \text{если иначе;} \end{cases}$$

$$g_2 = \begin{cases} 1 - \text{если клапан подачи шлама открыт } (R_{\text{кш}}), \\ 0 - \text{если иначе;} \end{cases}$$

$$g_3 = \begin{cases} 1 - \text{исправен дымосос отходящих газов } (F_{\text{дд1}}), \\ 0 - \text{если иначе;} \end{cases}$$

$$g_4 = \begin{cases} 1 - \text{исправен дымосос отходящих газов } (F_{\text{дд2}}), \\ 0 - \text{если иначе;} \end{cases}$$

где $F_{\text{ш}}$ – флаг наличия шлама на входе в печь (1 – есть, 0 – нет), $R_{\text{кш}}$ – флаг состояния клапана шлама (1 – открыт, 0 – закрыт), $F_{\text{дд1}}$ – исправность дымососа 1 (1 – исправен, 0 – иначе), $F_{\text{дд2}}$ – исправность дымососа 2 (1 – исправен, 0 – иначе).

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

Расход шлама $Q_{\text{ш}}$:

$$V_1 = \begin{cases} g_{11} = \begin{cases} 1 - \text{если } Q_{\text{ш}} \in Q_{\text{м}}^{\text{ш}}, \\ 0 - \text{если } Q_{\text{м}}^{\text{ш}} < Q_{\text{ш}} < Q_{\text{ср}}^{\text{ш}}, \end{cases} \\ g_{12} = \begin{cases} 1 - \text{если } Q_{\text{ш}} \in Q_{\text{ср}}^{\text{ш}}, \\ 0 - \text{если } Q_{\text{ср}}^{\text{ш}} < Q_{\text{ш}} < Q_{\text{б}}^{\text{ш}}, \end{cases} \\ g_{13} = \begin{cases} 1 - \text{если } Q_{\text{ш}} \in Q_{\text{б}}, \\ 0 - \text{если иначе.} \end{cases} \end{cases}$$

где $Q_{\text{м}}^{\text{ш}}$ – малый, $Q_{\text{ср}}^{\text{ш}}$ – средний, $Q_{\text{б}}^{\text{ш}}$ – большой;

Разрежение за обрезом печи $P_{\text{оп}}$:

$$V2 = \begin{cases} g21 = \begin{cases} 1 - \text{если } P_{\text{оп}} \in P^{\text{оп}}_{\text{м}}, \\ 0 - \text{если } P^{\text{оп}}_{\text{м}} < P_{\text{оп}} < P^{\text{оп}}_{\text{ср}}, \end{cases} \\ g22 = \begin{cases} 1 - \text{если } P_{\text{оп}} \in P^{\text{оп}}_{\text{ср}}, \\ 0 - \text{если } P^{\text{оп}}_{\text{ср}} < P_{\text{оп}} < P^{\text{оп}}_{\text{б}}, \end{cases} \\ g23 = \begin{cases} 1 - \text{если } P_{\text{оп}} \in P^{\text{оп}}_{\text{б}}, \\ 0 - \text{если иначе.} \end{cases} \end{cases}$$

где $P^{\text{оп}}_{\text{м}}$ – малое, $P^{\text{оп}}_{\text{ср}}$ – среднее, $P^{\text{оп}}_{\text{б}}$ – большое;
Влажность сырья $W_{\text{ш}}$:

$$V3 = \begin{cases} g31 = \begin{cases} 1 - \text{если } W_{\text{ш}} \in W^{\text{ш}}_{\text{м}}, \\ 0 - \text{если } W^{\text{ш}}_{\text{м}} < W_{\text{ш}} < W^{\text{ш}}_{\text{ср}}, \end{cases} \\ g32 = \begin{cases} 1 - \text{если } W_{\text{ш}} \in W^{\text{ш}}_{\text{ср}}, \\ 0 - \text{если } W^{\text{ш}}_{\text{ср}} < W_{\text{ш}} < W^{\text{ш}}_{\text{б}}, \end{cases} \\ g33 = \begin{cases} 1 - \text{если } W_{\text{ш}} \in W_{\text{б}}, \\ 0 - \text{если иначе.} \end{cases} \end{cases}$$

где $W^{\text{ш}}_{\text{м}}$ – низкая, $W^{\text{ш}}_{\text{ср}}$ – нормальная, $W^{\text{ш}}_{\text{б}}$ – высокая.

В соответствии с управляющими и возмущающими технологическими условиями строится технологическая структура [6] узла «Температура отходящих газов» (рис. 3).

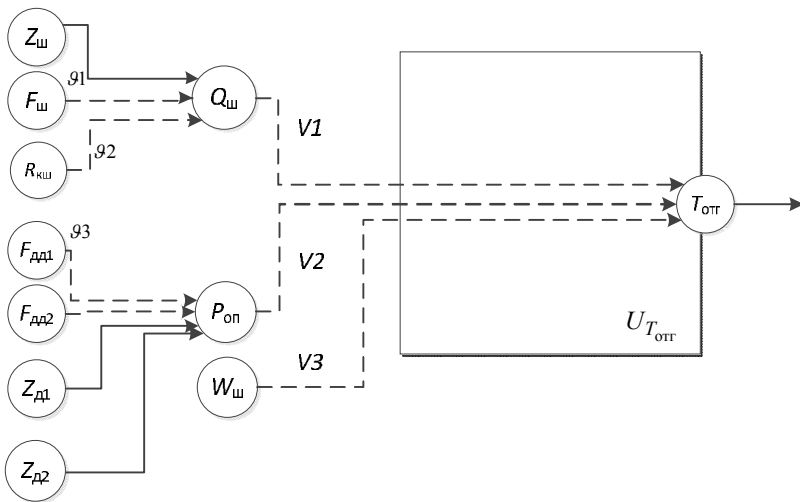


Рисунок 3 – Технологическая структура узла
«Температура отходящих газов»

————> Влияние степени открытия шиберов подачи шлама и шиберов дымососов;

- - -> Влияние управляющих технологических условий.

Построив структуру узла, переходим к построению нечеткой диаграммы поведения узла 1-го ранга (рис. 4), в которой вершины (1 – 3) соответствуют нечетким статическим режимам, а (4 – 7) – динамическим режимам работы печи [7].

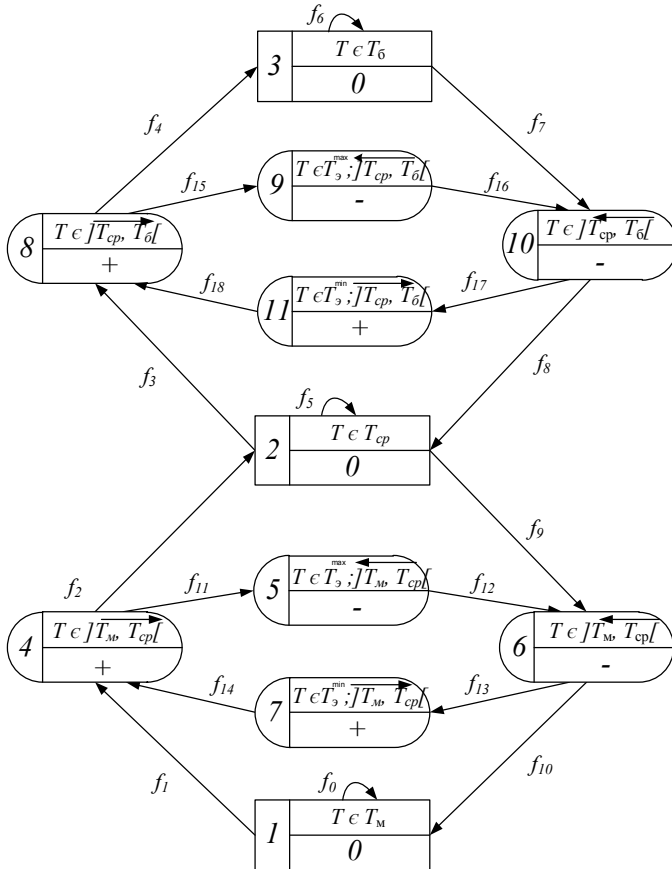


Рисунок 4 – Нечеткая диаграмма поведения узла «Температура отходящих газов»

Условия перехода f_i , представлены ниже:

$$Q_1 = \mathcal{G}_1 \wedge \mathcal{G}_2 \wedge \mathcal{G}_3 \wedge \mathcal{G}_4;$$

$$f_0 = (\text{not } Q_1) \vee (Q_1 \vee ((\mathcal{G}_{13} \wedge \mathcal{G}_{21}) \wedge (z_M^{n1} \wedge z_M^{n2})))$$

$$f_1 = Q_1 \wedge ((\mathcal{G}_{12} \wedge \mathcal{G}_{11}) \wedge (\mathcal{G}_{22} \wedge \mathcal{G}_{23}) \wedge ((z_{cp}^{n1} \vee z_6^{n1}) \wedge (z_{cp}^{n2} \vee z_6^{n2})));$$

$$f_2 = Q_1 \wedge ((\mathcal{G}_{12} \wedge \mathcal{G}_{11}) \wedge (\mathcal{G}_{22} \wedge \mathcal{G}_{23}) \wedge ((z_{cp}^{n1} \vee z_6^{n1}) \wedge (z_{cp}^{n2} \vee z_6^{n2})));$$

Структура узла «Температура материала в зоне сушки» может быть представлена в виде «черного ящика», как на рис. 6.

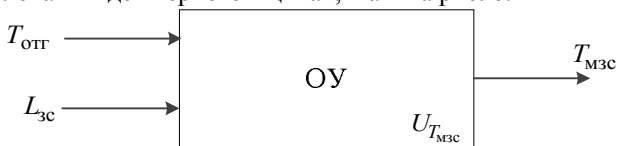


Рисунок 6 – Структура узла «Температура материала в зоне сушки» $U_{T_{МЗС}}$

На узел влияют две основные величины: $T_{отг}$ – расход шлама, $L_{зс}$ – разрежение за обрезом печи.

Разделение величин по нечетким градациям значений:

4. Температура отходящих газов $T_{отг}$ (°C), которую определяет процент открытия шиберов дымососов $z_{д1}$ и $z_{д2}$ (%). Запишем их в виде следующих термов: малый ($T_{отг}^{м}$), средний ($T_{отг}^{ср}$) и большой ($T_{отг}^{б}$); малый ($z_{д1}^м$), средний ($z_{д1}^{ср}$), большой ($z_{д1}^б$); малый ($z_{д2}^м$), средний ($z_{д2}^{ср}$) и большой ($z_{д2}^б$).

5. Длина зоны спекания $L_{зс}$ (м): малая ($L_{зс}^м$), средняя ($L_{зс}^{ср}$) и большая ($L_{зс}^б$).

Выходной технологической величиной для данного узла является температура материала в зоне сушки $T_{МЗС}$ (°C): малая ($T_{МЗС}^м$), средняя ($T_{МЗС}^{ср}$), большая ($T_{МЗС}^б$).

С учетом введенных обозначений и по результатам теоретических исследований, а также в соответствии с мнениями эксперта–технолога, отвечающего за производство клинкера, и операторов печи, построены следующие функции принадлежности узла $U_{T_{МЗС}}$ (рис. 7).

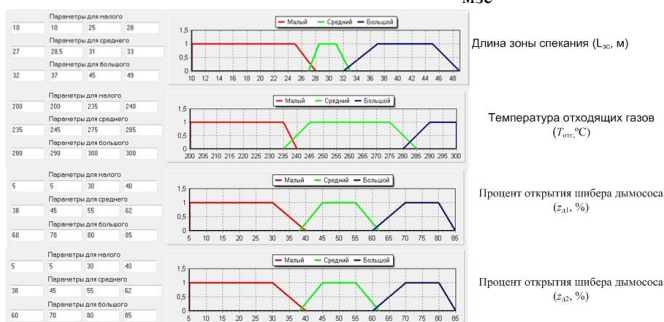


Рисунок 7 – Функции принадлежности узла «Температура материала в зоне сушки»

Составим управляющие и возмущающие технологические условия.

Управляющие технологические условия для формирования зоны спекания g_1 , исправности дымососов отходящих газов g_2, g_3 запишем в виде:

$$g_1 = \begin{cases} 1 - \text{зона спекания сформирована } (F_{зс}), \\ 0 - \text{если иначе;} \end{cases}$$

$$g_2 = \begin{cases} 1 - \text{исправен дымосос отходящих газов } (F_{дд1}), \\ 0 - \text{если иначе;} \end{cases}$$

$$g_3 = \begin{cases} 1 - \text{исправен дымосос отходящих газов } (F_{дд2}), \\ 0 - \text{если иначе,} \end{cases}$$

где $F_{зс}$ – состояние зоны спекания (1 – сформирована, 0 – иначе), $F_{дд1}$ – исправность дымососа 1 (1 – исправен, 0 – иначе), $F_{дд2}$ – исправность дымососа 2 (1 – исправен, 0 – иначе).

Возмущающие технологические условия для величин – температура отходящих газов $T_{отг}$, длина зоны спекания $L_{зс}$ запишем в виде:

Температура отходящих газов $T_{отг}$:

$$V_2 = \begin{cases} g_{21} = \begin{cases} 1 - \text{если } T_{отг} \in T_{отг\ м}, \\ 0 - \text{если } T_{отг\ м} < T_{отг} < T_{отг\ ср}, \end{cases} \\ g_{22} = \begin{cases} 1 - \text{если } T_{отг} \in T_{отг\ ср}, \\ 0 - \text{если } T_{отг\ ср} < T_{отг} < T_{отг\ б}, \end{cases} \\ g_{23} = \begin{cases} 1 - \text{если } T_{отг} \in T_{отг\ б}, \\ 0 - \text{если иначе.} \end{cases} \end{cases}$$

где $T_{отг\ м}$ – малый, $T_{отг\ ср}$ – средний, $T_{отг\ б}$ – большой;

Длина зоны спекания $L_{зс}$:

$$V1 = \begin{cases} g11 = \begin{cases} 1 - \text{если } L_{зс} \in L_{зс}^{зс м}, \\ 0 - \text{если } L_{зс}^{зс м} < L_{зс} < L_{зс}^{зс ср}, \end{cases} \\ g12 = \begin{cases} 1 - \text{если } L_{зс} \in L_{зс}^{зс ср}, \\ 0 - \text{если } L_{зс}^{зс ср} < L_{зс} < L_{зс}^{зс б}, \end{cases} \\ g13 = \begin{cases} 1 - \text{если } L_{зс} \in L_{б}, \\ 0 - \text{если иначе;} \end{cases} \end{cases}$$

где $L_{м}^{оп}$ – малая, $L_{ср}^{оп}$ – средняя, $L_{б}^{оп}$ – большая;

В соответствии с управляющими и возмущающими технологическими условиями строится технологическая структура узла «Температура материала в зоне сушки» (рис. 8).

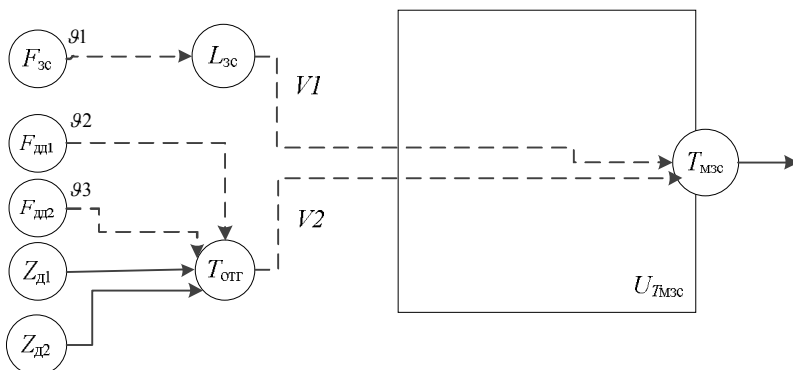


Рисунок 8 – Технологическая структура узла «Температура материала в зоне сушки»

—> Влияние степени открытия шиберов подачи шлама и шиберов дымососов;

- -> Влияние управляющих технологических условий.

Построив структуру узла, переходим к построению нечеткой диаграммы поведения узла 1-го ранга (рис. 9), в которой вершины (1 – 3) соответствуют нечетким статическим режимам, а (4 – 7) – динамическим режимам работы печи.

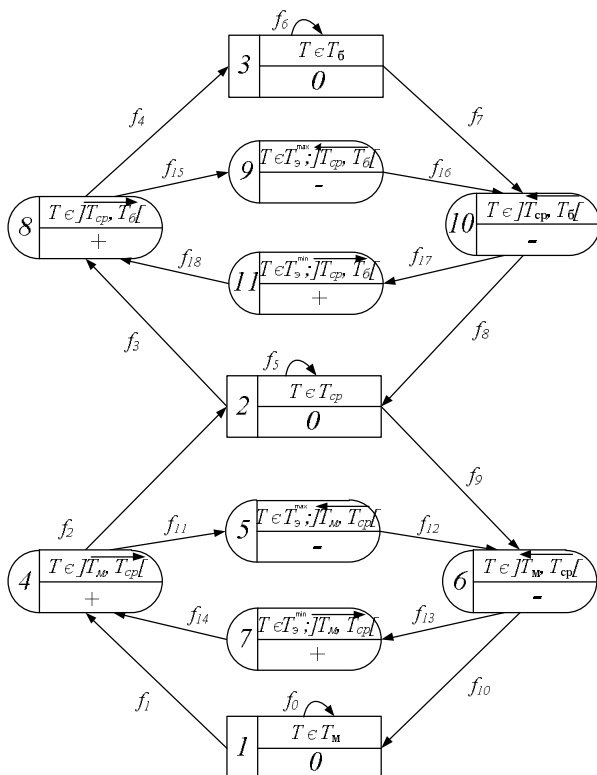


Рисунок 9 – Нечеткая диаграмма поведения узла «Температура материала в зоне сушки»

Условия перехода f_i , представлены ниже:

$$Q_1 = \mathcal{G}_1 \wedge \mathcal{G}_2 \wedge \mathcal{G}_3 \wedge \mathcal{G}_4;$$

$$f_0 = (\text{not } Q_1) \vee (Q_1 \vee ((\mathcal{G}_3 \wedge \mathcal{G}_{21}) \wedge (z_M^{\pi 1} \wedge z_M^{\pi 2})))$$

$$f_1 = Q_1 \wedge ((\mathcal{G}_{12} \wedge \mathcal{G}_{11}) \wedge (\mathcal{G}_{22} \wedge \mathcal{G}_{23}) \wedge ((z_{cp}^{\pi 1} \vee z_6^{\pi 1}) \wedge (z_{cp}^{\pi 2} \vee z_6^{\pi 2})));$$

$$f_2 = Q_1 \wedge ((\mathcal{G}_{12} \wedge \mathcal{G}_{11}) \wedge (\mathcal{G}_{22} \wedge \mathcal{G}_{23}) \wedge ((z_{cp}^{\pi 1} \vee z_6^{\pi 1}) \wedge (z_{cp}^{\pi 2} \vee z_6^{\pi 2})));$$

$$f_{12} = f_9; \quad f_{13} = f_7; \quad f_{14} = f_3; \quad f_{10} = f_0; \quad f_{11} = f_9; \quad f_{13} = f_1; \quad f_{14} = f_1;$$

$$f_{15} = f_7; \quad f_{16} = f_7; \quad f_{17} = f_3; \quad f_{18} = f_3$$

$$f_5 = Q_1 \wedge \mathcal{G}_{12} \wedge \mathcal{G}_{22} \wedge z_{cp}^{\pi 1} \wedge z_{cp}^{\pi 2};$$

$$f_3 = Q_1 \wedge ((\mathcal{G}_{11} \wedge \mathcal{G}_{23}) \wedge (z_6^{\Delta 1} \wedge z_6^{\Delta 2}));$$

$$f_4 = Q_1 \wedge ((\mathcal{G}_{11} \wedge \mathcal{G}_{23}) \wedge (z_6^{\Delta 1} \wedge z_6^{\Delta 2}));$$

$$f_6 = Q_1 \wedge \mathcal{G}_{11} \wedge \mathcal{G}_{23} \wedge z_6^{\Delta 1} \wedge z_6^{\Delta 2};$$

$$f_7 = f_0 \vee ((\mathcal{G}_{12} \wedge \mathcal{G}_{13}) \wedge (\mathcal{G}_{22} \wedge \mathcal{G}_{21}) \wedge ((z_{cp}^{\Delta 1} \vee z_M^{\Delta 1}) \wedge (z_{cp}^{\Delta 2} \vee z_M^{\Delta 2})));$$

$$f_8 = (f_0 \vee ((\mathcal{G}_{12} \wedge \mathcal{G}_{13}) \wedge (\mathcal{G}_{22} \wedge \mathcal{G}_{21}) \wedge ((z_{cp}^{\Delta 1} \vee z_M^{\Delta 1}) \wedge (z_{cp}^{\Delta 2} \vee z_M^{\Delta 2})))) \vee (Q_1 \wedge \mathcal{G}_{12} \wedge \mathcal{G}_{22} \wedge z_{cp}^{\Delta 1} \wedge z_{cp}^{\Delta 2});$$

$$f_9 = f_0 \vee (\mathcal{G}_{13} \wedge \mathcal{G}_{21} \wedge (z_M^{\Delta 1} \wedge z_M^{\Delta 2})).$$

Используя построенную нечеткую диаграмму поведения, необходимо записать очередность переходов от одного режима работы к другому в виде последовательности операций. Данную конструкцию назовем разверткой для узла «Температура материала в зоне сушки», которая показана на рис. 10. По развертке можно отследить нормальную работу технологической величины, а так же выявить возникновение нештатных ситуаций.

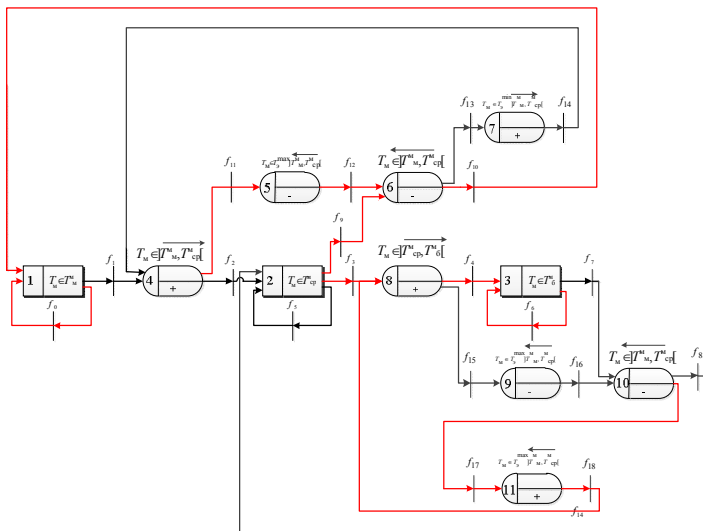


Рисунок 10 – Развертка для узла «Температура материала в зоне сушки»

→ Возникновение нештатных ситуаций.

Исходя из построенных разверток узлов «Температура отходящих газов» и «Температура материала в зоне сушки», можно проследить взаимосвязь данных технологических величин. Температура отходящих газов является выходной технологической величиной, но в тоже время оказывает воздействие на узел «Температура материала в зоне сушки» в качестве входной возмущающей технологической величины. Соответственно, выход температуры отходящих газов за пределы нормального режима работы, будет оказывать существенное влияние на технологическую величину - температура материала в зоне сушки, вплоть до возникновения нештатных ситуаций.

Полученные модели узлов в дальнейшем будут использованы при разработке логической структуры управления, реализации совокупной работы всех узлов печного агрегата и для написания производственных правил по управлению вращающейся печью.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта №14-41-08016 «р_офи_м».

Список литературы:

1. Древицкий Е.Г., Добровольский А.Г., Коробок А.А. Повышение эффективности работы вращающихся печей. М.: Стройиздат, 1990. 224 с.
2. Интеллектуальная советующая система управления цементными вращающимися печами с применением технического зрения / В.З. Магергут, Д.А. Юдин, А.Г. Бажанов, В.А. Порхало, А.С. Копылов, А.А. Степовой, Р.А. Ващенко // Мир цемента. 2013. № 2. С. 51–59.
3. Подходы к построению дискретных моделей непрерывных технологических процессов для синтеза управляющих автоматов / В.З. Магергут, В.А. Игнатенко, А.Г. Бажанов, В.Г. Шапгала // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. № 2. С. 100–102.
4. 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.
5. Классен В.К. Технология и оптимизация производства цемента: краткий курс лекций. Белгород: Изд-во БГТУ. 2012. 308 с.
6. 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.

7. Интеллектуальные подходы к созданию советующей системы управления вращающейся цементной печью обжига клинкера / А.Г. Бажанов, А.С. Копылов, В.А. Порхало, Д.А. Юдин, Е.Б. Кариков, В.Г. Рубанов, В.З. Магергут // Цемент и его применение. 2013. № 3. С. 77–82.