

УДК 666.9:681.5

**НЕЧЕТКАЯ ДИАГРАММА ПОВЕДЕНИЯ УЗЛА НАГРУЗКИ ГЛАВНОГО ПРИВОДА ЦЕМЕНТНОЙ ПЕЧИ**

А.Г. Бажанов, В.Э. Магергут

Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова

E-mail: all\_exe@mail.ru

Описывается создание нечеткой диаграммы поведения узла приращения нагрузки на главный привод печи № 1 ЗАО «Осколцемент». Выбор данного узла был основан на его значительной роли в управлении всем объектом, что подтверждается не только мнением технологов и операторов печи, но и статистическими данными, полученными из базы данных завода. Для построения данной диаграммы были изначально использованы упрощенные модели балансов и динамики для уровня шлама в печи и ее момент инерции, которые можно получить исходя из структуры и технологии работы объекта. Диаграмма строится на основе данных математических моделей, учитывая зависимые для выбранного узла технологические величины, и описывает нечеткие связи между входными и выходными технологическими величинами объекта, что обусловлено сложностью его работы и управления.

**Ключевые слова:**

Цементная печь, система управления, нечеткая диаграмма поведения, узел приращения нагрузки, уравнения балансов.

**Key words:**

Wet rotary cement kiln, control system, fuzzy behavior chart, load increment node, equations of balances.

Важнейшую роль в производстве цемента по «мокрому» способу играет обжиг клинкера, который производится во вращающихся печах. Уровень автоматизации на существующих «мокрых» печах для обжига является низким, контроль за состоянием печи и ее управление ведется зачастую по устаревшим аналоговым приборам. Даже на печах с уже существующим техническим комплексом по автоматизации существенную роль в управлении играет человек, он принимает все решения, основываясь на показаниях приборов, выведенных на его автоматизированное рабочее место оператора (АРМ). Полное исключение человека из системы управления печью с применением традиционных методов автоматизации затруднено сложностью протекающих в печи физико-химических процессов и невозможностью построения математической модели этих процессов.

В связи с тем, что человеку сложно длительное время быть сконцентрированным на процессе управления и из-за усталости он может принимать ошибочные решения, возникает задача построения автоматизированной системы управления, полностью или частично повторяющей функции человека, созданной или обученной с участием операторов, управляющих вращающейся печью. Для создания такой системы необходимо иметь описание и анализ поведения технологических величин (узлов) цементной обжиговой печи.

В данной работе рассмотрено построение алгоритма функционирования узла приращения нагрузки на главный привод цементной печи № 1 ЗАО «Осколцемент» в виде так называемой нечеткой диаграммы поведения узла [1]. Алгоритма работы печи в целом и данного узла в частности на данный момент не существует в виде формализованной структуры, только лишь в виде регламентных правил на естественном языке, обращенных к машинисту печи с основанием функционирования на базе его личного опыта.

Диаграмма поведения [1] позволяет кроме описания объекта на базе имеющихся математических описаний балансов выявить неучтенные в объекте нештатные и аварийные ситуации вследствие своей замкнутости и возможности прохода по любой из дуг. Нечеткая диаграмма позволяет проводить аналогичный анализ для объектов с неформализованными алгоритмами, а также объектов с нечеткими правилами работы, что присутствует в рассматриваемом объекте.

Нагрузку на главный привод печи ( $N$ ) – ток, протекающий через обмотки двигателя, примем как величину, зависящую от двух составляющих:

$$N = f(H_{\text{ш}}, J_0), \quad (1)$$

где  $H_{\text{ш}}$  – уровень шлама в печи;  $J_0$  – общий момент инерции, который складывается из момента инерции шлама ( $J_{\text{ш}}$ ) и момента инерции самой печи ( $J_{\text{п}}$ ). В силу того, что  $J_{\text{п}} = \text{const}$ , при переходе к уравнению динамики в приращениях получим, что  $\Delta J_0 = \Delta J_{\text{ш}}$ , где  $\Delta$  – знак приращения.

Изменение уровня шлама в печи представим следующим уравнением:

$$S \frac{dH_{\text{ш}}}{dt} = Q_{\text{ш}} - Q_{\text{к}},$$

где  $S$  – площадь поверхности шлама, заполняющего печь;  $Q_{\text{ш}}$  – подача шлама в печь;  $Q_{\text{к}}$  – выход клинкера, причем можно принять, что

$$Q_{\text{ш}} = f(z_{\text{ш}}), \quad (2)$$

$$Q_{\text{к}} = f(V, H_{\text{ш}}, \alpha, \eta),$$

где  $z_{\text{ш}}$  – степень открытия шиберы подачи шлама;  $V$  – скорость вращения печи;  $\alpha$  – угол наклона печи;  $\eta$  – вязкость шлама. Так как  $\alpha = \text{const} = 4\%$  к уровню горизонта, а  $\eta$  – коррелирована с  $H_{\text{ш}}$ , при переходе к уравнению динамики в приращениях примем, что

$$\Delta Q_{\text{к}} = f(\Delta V, \Delta H_{\text{ш}}). \quad (3)$$

С учетом принятых допущений изменение приращения общего момента инерции можно представить в виде следующей функциональной зависимости:

$$\frac{d\Delta J_o}{dt} = f(\Delta V, \Delta Q_{ш}, \Delta H_{ш}, \Delta Q_{к}, \Delta \eta, \Delta m_{ш}),$$

где  $\Delta m_{ш}$  – приращение массы шлама в печи. В силу выражения (3) и взаимосвязи  $m_{ш}$ ,  $\eta$  с  $H_{ш}$  получаем зависимость для  $\Delta J_o$  вида:

$$\frac{d\Delta J_o}{dt} = f(\Delta V, \Delta Q_{ш}, \Delta H_{ш}). \quad (4)$$

Таким образом, исходя из (2), (3), (4) и [1, 2] в вектор входных управляющих технологических величин будут входить:  $\Delta V$ ,  $\Delta Q_{ш}$ ,  $\Delta H_{ш}$ . К вектору управляющих воздействий будет относиться  $z_{ш}$ .

Тогда выражение (1) представим в виде:

$$\Delta N = f(\Delta V, \Delta Q_{ш}, \Delta H_{ш}). \quad (5)$$

Исходя из функциональной зависимости (5) составим структуру узла [1] приращения нагрузки на главный привод цементной печи (рис. 1) в виде зависимостей от входных приращений соответствующих величин:

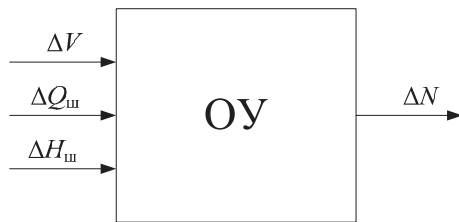


Рис. 1. Структура узла приращений нагрузки на главный привод печи

С целью составления нечеткой диаграммы поведения разделим входящие в структуру узла величины по нечетким градациям значений (при этом для упрощения записей знак  $\Delta$  будем опускать):

- 1) скорость вращения печи  $V$ , которую определяет скорость двигателя  $z_d$ :  $z_d$  – привод остановлен, минимальная, низкая, средняя,  $z_{d \max}$  – максимальная;
- 2) процент открытия шиберов шлама  $z_{ш}$ , который определяет подачу шлама в печь  $Q_{ш}$ :  $z_{ш}$ , приоткрыт, открыт больше  $h_{i-1}$ , открыт меньше  $h_{i-1}$ , открыт меньше максимума,  $z_{ш \max}$  – максимальный;
- 3) высота шлама в печи:  $H_m$  – средняя, высокая,  $H_{\max}$  – максимальная;
- 4) нагрузка на двигатель:  $N_m$  – малая,  $N_{cp}$  – средняя,  $N_b$  – большая,  $N_{\max}$  – максимальная.

Далее составим технологическую структуру узла приращения  $N$  (рис. 2), для чего необходимо выполнить следующий комплекс действий:

1. Определить область изменения выходной координаты узла и выявить на ней характерные точки – в данном случае это нечеткие характеризующие правила.
2. Исходя из статистических данных и экспертных оценок, определить поведение узла на нечетких интервалах.

3. Выявить параметры, от которых зависит конкретный узел, то есть все потоки в объекте.
4. Построить схему по описанным правилам [1].
5. Записать управляющие и возмущающие ТУ узла, проставляя их над соответствующими связями.

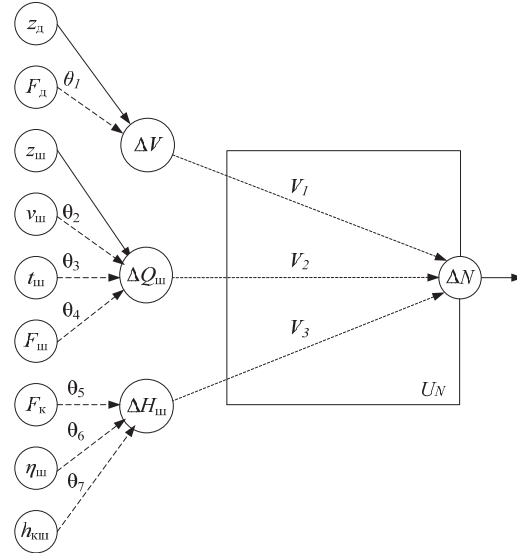


Рис. 2. Технологическая структура узла приращения  $N$  цементной печи

На рис. 2 используются следующие обозначения:  $v_{ш}$  – влажность шлама;  $v_{кр}$  – критическая влажность, при которой движение шлама невозможно;  $\eta_{ш}$  – вязкость шлама в зонах декарбонизации, экзотермических реакций и начальной части зоны спекания;  $\eta_{кр}$  – критическая вязкость, при которой возможно образование колец;  $h_{кш}$  – высота шлама в основных зонах печи: декарбонизации, экзотермических реакций и начальной части зоны спекания;  $h_{кр}$  – критическая высота, при которой возможно образование колец;  $t_{ш}$  – температура застывания;  $F_d$  – флаг исправности двигателя печи (1 – исправен, 0 – неисправен);  $F_k$  – флаг наличия кольца в печи (1 – есть, 0 – нет);  $F_{ш}$  – флаг наличия шлама на входе в печь (1 – есть, 0 – нет). Индексами м, ср, б, тах обозначим соответствующие нечеткие градации величин – малый, средний, большой, максимальный.

Составим управляющие технологические условия, влияющие на узел нагрузки главного привода цементной печи:

$$\theta_1 = \begin{cases} 1 - \text{если привод печи исправен } (F_d), \\ 0 - \text{если иначе,} \end{cases}$$

$$\theta_2 = \begin{cases} 1 - \text{если } v_{ш} < v_{кр}, \\ 0 - \text{если иначе,} \end{cases}$$

$$\theta_3 = \begin{cases} 1 - \text{если } t_{ш} \geq t_{ш3}, \\ 0 - \text{если иначе,} \end{cases}$$

$$\theta_4 = \begin{cases} 1 - \text{если есть шлам } (F_{ш}), \\ 0 - \text{если иначе,} \end{cases}$$

$$\theta_5 = \begin{cases} 1 - \text{если есть кольца } (F_k), \\ 0 - \text{если иначе,} \end{cases}$$

$$\theta_6 = \begin{cases} 1 - \text{если } \eta_{ш} < \eta_{кр}, \\ 0 - \text{если иначе,} \end{cases}$$

$$\theta_7 = \begin{cases} 1 - \text{если } h_{кш} < h_{кр}, \\ 0 - \text{если иначе.} \end{cases}$$

а также возмущающие технологические условия:

$$V_1 = \begin{cases} \theta_{11} = \begin{cases} 1 - \text{если } V=0, \\ 0 - \text{если } 0 < V < V_m, \end{cases} \\ \theta_{12} = \begin{cases} 1 - \text{если } V=V_m, \\ 0 - \text{если } V_m < V < V_{cp}, \end{cases} \\ \theta_{13} = \begin{cases} 1 - \text{если } V=V_{cp}, \\ 0 - \text{если } V_{cp} < V < V_6, \end{cases} \\ \theta_{14} = \begin{cases} 1 - \text{если } V=V_6, \\ 0 - \text{если } V_6 < V < V_{max}, \end{cases} \\ \theta_{15} = \begin{cases} 1 - \text{если } V=V_{max}, \\ 0 - \text{если иначе,} \end{cases} \end{cases}$$

$$V_2 = \begin{cases} \theta_{21} = \begin{cases} 1 - \text{если } Q_{ш} = 0, \\ 0 - \text{если } 0 < Q_{ш} < Q_m, \end{cases} \\ \theta_{22} = \begin{cases} 1 - \text{если } Q_{ш} = Q_m, \\ 0 - \text{если } Q_m < Q_{ш} < Q_{cp}, \end{cases} \\ \theta_{23} = \begin{cases} 1 - \text{если } Q_{ш} = Q_{cp}, \\ 0 - \text{если } Q_{cp} < Q_{ш} < Q_6, \end{cases} \\ \theta_{24} = \begin{cases} 1 - \text{если } Q_{шл} = Q_6, \\ 0 - \text{если } Q_6 < Q_{ш} < Q_{max}, \end{cases} \\ \theta_{25} = \begin{cases} 1 - \text{если } Q_{ш} = Q_{max}, \\ 0 - \text{если иначе,} \end{cases} \end{cases}$$

$$V_3 = \begin{cases} \theta_{31} = \begin{cases} 1 - \text{если } H_{ш} = H_m, \\ 0 - \text{если } H_m < H_{ш} < H_{cp}, \end{cases} \\ \theta_{32} = \begin{cases} 1 - \text{если } H_{ш} = H_{cp}, \\ 0 - \text{если } H_{cp} < H_{ш} < H_6, \end{cases} \\ \theta_{33} = \begin{cases} 1 - \text{если } H_{шл} = H_6, \\ 0 - \text{если } H_6 < H_{ш} < H_{max}, \end{cases} \\ \theta_{34} = \begin{cases} 1 - \text{если } H_{ш} = H_{max}, \\ 0 - \text{если иначе.} \end{cases} \end{cases}$$

С учетом технологической структурной схемы (рис. 2) и введенных ТУ была построена нечеткая диаграмма поведения узла  $N$  (рис. 3). В центре расположены вершины-прямоугольники с нечеткими статическими положениями для значений нагрузки на главный двигатель, по бокам – вершины-овалы, соответствующие динамике (слева – повы-

шение значений, справа – их снижение). Условия перехода между вершинами и сохранения статических состояний вершин, помечающие соответствующие дуги, обозначены как  $f_i$ . Они записываются в виде логических функций от ТУ и управляющих воздействий. При этом воспользуемся режимами 1-го ранга для обозначения состояний вершин.

Запишем переходы в виде нечетких правил:

$$Q_0 = \bar{\theta}_1 \vee \bar{\theta}_2 \vee \bar{\theta}_3 \vee \bar{\theta}_4 \vee \theta_{11};$$

$$Q_1 = \theta_6 \vee \theta_7;$$

$$f_{17} = \bar{Q}_0 \wedge Q_1 \wedge \bar{\theta}_5 \wedge \theta_{11} \wedge (z_{ш} - \text{приоткрыт} \wedge \wedge (z_d - \text{минимальная скорость} \vee \vee z_d - \text{низкая скорость}));$$

$$f_2 = \bar{Q}_0 \wedge Q_1 \wedge \bar{\theta}_5 \wedge \theta_{11} \wedge (z_{ш} - \text{приоткрыт} \wedge \wedge z_d - \text{минимальная скорость});$$

$$f_1 = \bar{Q}_0 \wedge Q_1 \wedge \bar{\theta}_5 \wedge \theta_{12} \wedge ((z_{ш} - \text{открыт больше, чем } f_2 \wedge \wedge (z_d - \text{минимальная скорость} \vee \vee z_d - \text{низкая скорость}) \vee (z_{ш} - \text{приоткрыт} \wedge \wedge z_d - \text{низкая скорость}));$$

$$f_3 = f_5 = \bar{Q}_0 \wedge Q_1 \wedge \bar{\theta}_5 \wedge \theta_{12} \wedge ((z_{ш} - \text{открыт больше, чем } f_1 \wedge z_d - \text{низкая скорость}) \vee (z_{ш} - \text{открыт как } f_4 \wedge z_d - \text{средняя скорость}));$$

$$f_4 = f_6 = \bar{Q}_0 \wedge (Q_1 \vee \theta_5) \wedge \theta_{13} \wedge (z_{ш} - \text{открыт больше, чем } f_5 \wedge (z_d - \text{низкая скорость} \vee \vee z_d - \text{средняя скорость}) \vee$$

$$\vee z_{ш} - \text{открыт меньше максимума} \wedge \wedge (z_d - \text{низкая скорость} \vee \vee z_d - \text{минимальная скорость}));$$

$$f_8 = \bar{Q}_0 \wedge (Q_1 \vee \theta_5) \wedge \theta_{13} \wedge (z_{ш} - \text{открыт меньше максимума} \wedge (z_d - \text{низкая скорость} \vee \vee z_d - \text{минимальная скорость}));$$

$$f_7 = \bar{Q}_0 \wedge (Q_1 \vee \theta_5) \wedge \theta_{14} \wedge (z_{ш} - \text{открыт меньше максимума} \wedge (z_d - \text{максимальная скорость} \vee \vee z_d - \text{средняя скорость}) \vee$$

$$\vee z_{ш} - \text{открыт максимально} \wedge z_d - \text{низкая скорость});$$

$$f_9 = \bar{Q}_0 \wedge (Q_1 \vee \theta_5) \wedge \theta_{14} \wedge (z_{ш} - \text{открыт максимально} \wedge \wedge z_d - \text{средняя скорость});$$

$$f_{10} = \bar{Q}_0 \wedge ((\theta_5 \vee \bar{Q}_1) \vee (\theta_5 \wedge \bar{Q}_1)) \wedge \theta_{15} \wedge \wedge (z_{ш} - \text{открыт максимально} \wedge \wedge z_d - \text{максимальная скорость});$$

$$f_{11} = Q_0 \wedge (Q_1 \vee \theta_5) \wedge \theta_{14} \vee z_{ш} - \text{открыт меньше максимума} \vee (z_{ш} - \text{открыт максимально} \wedge z_d - \text{средняя скорость});$$

$$f_{12} = Q_0 \wedge (Q_1 \vee \theta_5) \wedge \theta_{14} \vee$$

$$\vee z_{ш} - \text{открыт меньше максимума} \vee$$

$$\vee (z_d - \text{максимальная скорость} \vee \vee z_d - \text{средняя скорость}) \vee$$

$$\vee z_{ш} - \text{открыт максимально} \wedge z_d - \text{низкая скорость});$$

$$\begin{aligned}
 f_{13} &= f_{14} = Q_0 \wedge (Q_1 \vee \bar{\theta}_5) \wedge \theta_{13} \vee \\
 &\vee (z_{\text{ш}} - \text{открыт меньше } f_8 \wedge z_{\text{д}} - \text{низкая скорость}) \vee \\
 &\vee (z_{\text{ш}} - \text{открыт меньше максимума} \wedge \\
 &\wedge z_{\text{д}} - \text{средняя скорость}); \\
 f_{15} &= f_{16} = Q_0 \wedge \bar{Q}_1 \wedge \bar{\theta}_5 \wedge \theta_{12} \vee (z_{\text{ш}} - \text{открыт меньше } f_2 \wedge \\
 &\wedge z_{\text{д}} - \text{минимальная скорость}) \vee \\
 &\vee z_{\text{ш}} - \text{приоткрыт}; \\
 f_{17} &= \bar{Q}_0 \wedge Q_1 \wedge \bar{\theta}_5 \wedge \theta_{12} \wedge (z_{\text{ш}} - \text{открыт больше, чем } f_{15} \wedge \\
 &\wedge (z_{\text{д}} - \text{минимальная скорость} \vee \\
 &\vee z_{\text{д}} - \text{низкая скорость})); \\
 f_{18} &= Q_0 \wedge Q_1 \wedge \bar{\theta}_5 \wedge \theta_{12} \wedge z_{\text{ш}} - \text{открыт меньше, чем } f_1 \vee \\
 &\vee z_{\text{д}} - \text{низкая скорость} \vee \\
 &\vee z_{\text{д}} - \text{минимальная скорость}; \\
 f_{19} &= \bar{Q}_0 \wedge (Q_1 \vee \theta_5) \wedge \theta_{12} \wedge (z_{\text{ш}} - \text{открыт больше } f_{13} \wedge \\
 &\wedge z_{\text{д}} - \text{минимальная скорость}); \\
 f_{20} &= Q_0 \wedge (Q_1 \vee \theta_5) \vee z_{\text{ш}} - \text{открыт меньше } f_4 \wedge \\
 &\wedge (z_{\text{д}} - \text{низкая скорость} \vee \\
 &\vee z_{\text{д}} - \text{минимальная скорость}); \\
 f_{21} &= \bar{Q}_0 \wedge (Q_1 \vee \theta_5) \wedge (z_{\text{ш}} - \text{открыт максимально} \vee \\
 &\vee z_{\text{д}} - \text{высокая скорость}); \\
 f_{22} &= f_{11}.
 \end{aligned}$$

Таким образом, на основе рабочей базы данных ЗАО «Осколцемент» и уравнений балансов были получены функциональные зависимости, позволившие выявить вектор управляющих технологических величин для узла приращений  $N$ . Вследствие чего была достигнута основная цель работы – описан алгоритм функционирования узла приращений нагрузки главного привода цементной печи в виде нечеткой диаграммы поведения узла.

Результатом данной работы является построение нечеткой диаграммы поведения узла прира-

щения нагрузки на главный привод печи с возможностью построения разверток [1] нечеткой диаграммы поведения при различных режимах работы и последующим преобразованием их в помеченную сеть Петри, отражающую динамику объекта относительно узла. Проводя анализ сети, можно получить базу правил для нечеткого регулятора, который планируется внедрить в работу системы. Система управления на данном этапе планируется как советуемая с разработкой рекомендаций для оператора печи, позволяющих ему наиболее быстро и правильно реагировать на изменение характеристик печи, а также избегать ошибок в анализе ситуации.

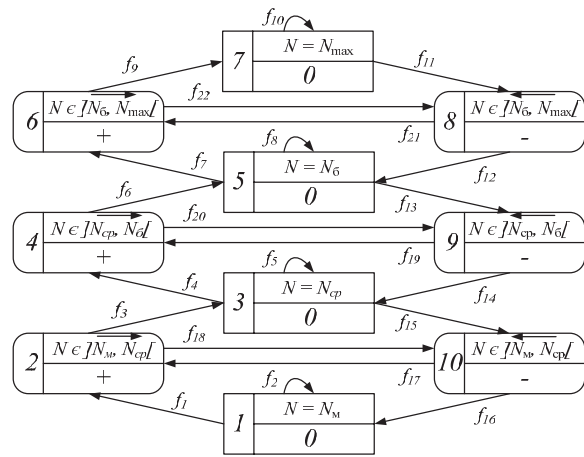


Рис. 3. Нечеткая диаграмма первого ранга поведения узла приращений  $N$

Построенная нечеткая диаграмма поведения узла приращения нагрузки на главном приводе печи позволяет говорить о создании алгоритма управления цементной печью путем включения его в комплексную структуру автоматизированной системы управления.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. 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.

2. Классен В.К. Обжиг цементного клинкера. – Красноярск: Стройиздат, 1994. – 323 с.