

ции оператору, и алгоритм реализуется по его командам. При возникновении аварии всегда автоматически запускается алгоритм аварийной остановки.

Заключение

Проведенные исследования и разработки позволяют сделать вывод о том, что описанный подход может быть эффективно использован для создания как имитационных моделей промышленных установок, так и компьютерных средств моделирования дискретно-непрерывных процессов.

Список литературы

1. Avizzano C.A. Review of existing simulation tools. — <http://sirslab.dii.unisi.it/I-RAS/wp-content/uploads/2008/05/simulinkreviewx>.
2. Astrom K., Elmqvist H., Mattsson S. Evolution of continuous-time modeling and simulation // Proceedings of the 12th European Simulation Multiconference, ESM'98, 1998. <http://www.modelica.org/publications/papers/esm98his.pdf>
3. Попов Э.В. Статические и динамические экспертные системы. М.: Финансы и статистика. 1996. <http://www.info.oglib.ru/bgl/751.html>.
4. Henzinger T.A. The Theory of Hybrid Automata // Proceedings of the 11th Annual IEEE Symposium on Logic in Computer Science (LICS 96). 1996.
5. Alur R., Henzinger T. A., Lafferriere G., Pappas G.J. Discrete Abstractions of Hybrid Systems // Proceedings of the IEEE. 2000. Vol. 88, № 7
6. Шнаков В.М. Прототип среды моделирования структурированных совокупностей взаимодействующих процессов // Сб. докладов II всероссийской научно-практич. конф. "Имитационное моделирование. Теория и практика". Т.П. С.-Петербург. 2005.
7. Шнаков В.М. Спецификация знаний динамики на основе транзитивной модели непрерывных процессов // Тр. СПИИРАН / Под ред. Р.М. Юсупова, СПб: Наука, 2006. Вып. 3. Т. 1.
8. Буткевич И.К., Рыдник Е.А., Шнаков В.М. Новое о старом: об автоматизации криогенных гелиевых установок // Холодильный бизнес. 2001. №2.

Шнаков Владимир Михайлович — ст. научный сотрудник

Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН.

Контактный телефон (812)328-80-71, факс (812) 328-44-50. E-mail: vlad@iias.spb.su

АЛГОРИТМ НЕЧЕТКОГО УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ СИНТЕЗА ЦИФРОВЫХ КОНТУРОВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

П.Г. Полько, О.С. Логунова, С.М. Андреев, Е.С. Рябчикова, М.Ю. Рябчиков, Б.Н. Парсункин
(ГОУ ВПО "Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова)

Приведены результаты имитационного моделирования цифрового контура стабилизации инерционного с запаздыванием параметра ТП, синтезированного с использованием нечетких множеств и нечетких логических выводов, способного эффективно функционировать в условиях неполной информации об управляемом параметре. Показаны преимущества нечеткого управления, использующего упрощенные математические модели технологических объектов управления.

Ключевые слова: нечеткое управление, нечеткие регуляторы, правила нечеткого управления, качество переходного процесса.

В связи с интенсивным развитием программируемых технических средств управления все более широкое распространение получают системы, основанные на принципах теорий нечетких множеств и нечетких логических выводов [1, 2]. Нечеткое управление оказывается особенно полезным, когда ТП являются

слишком сложными и доступные источники информации интерпретируются атрибутивно, качественно, неточно или неопределенно.

Целью представленных исследований является синтез цифрового контура автоматической стабилизации технологических параметров с применением исполнительных механизмов постоянной скорости. В данной работе приведены результаты по синтезу и исследованию программно реализованной системы нечеткого управления подачей исходного рудного материала в агрегат предварительного мокрого измельчения барабанного типа, работающего в открытом режиме. Задачей системы является обеспечение стабильной работы измельчительного агрегата в условиях неполной информации об управляемом процессе.

Структурная схема синтезируемой замкнутой системы нечеткого управления технологическим параметром представлена на рис. 1.

Динамические свойства управляемого технологического параметра аппроксимируются последовательным соединением статического звена с характеристикой $F(X_{BX})$ и двух инерционных звеньев первого

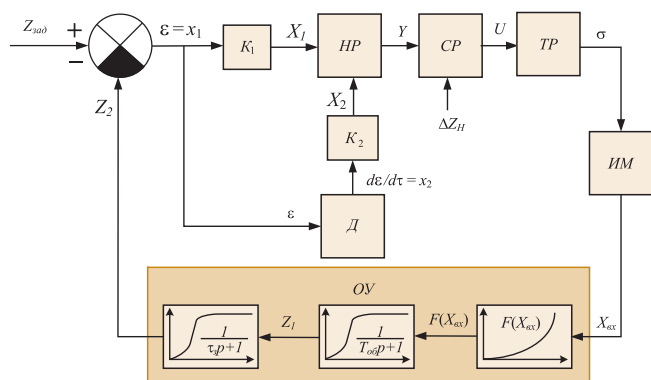


Рис. 1. Структурная схема синтезируемой замкнутой системы нечеткого управления инерционным технологическим параметром с запаздыванием

порядка с постоянными времени $T_{об}$ и τ_3 , где $T_{об}$ — характеризует инерционные, τ_3 — запаздывающие свойства процесса измельчения.

Правомомерность замены передаточной функции звена запаздывания передаточной функцией инерционного звена обеспечивается соблюдением условия $T_{об} \gg \tau_3$ [3].

Характеристика статического звена (в реальных условиях неизвестна) определяется по экспериментальным данным полиномом $F(X_{BX})$ следующего вида:

$$F(X_{BX}) = a_0 + a_1 \cdot X_{BX} + a_2 \cdot X_{BX}^2 + \dots + a_n \cdot X_{BX}^n, \quad (1)$$

где a_i при $i \in N$ — коэффициенты уравнения, определяемые с помощью метода наименьших квадратов по экспериментальным данным; X_{BX} — входное управляющее воздействие, определяемое перемещением исполнительного механизма с постоянной скоростью в процессе управления путем изменения скорости транспортного питателя частотным преобразователем.

Траектория изменения во времени параметра $Z_1(\tau)$ определяется из решения уравнения (2) с использованием численного метода Эйлера:

$$T_{об} \frac{dZ_1}{d\tau} + Z_1(\tau) = F[X_{BX}(\tau)], \quad (2)$$

где τ — текущее время.

Изменение выходного управляемого параметра во времени $Z_2(\tau)$ определяется аналогично из решения уравнения (3):

$$\tau_3 \frac{dZ_2}{d\tau} + Z_2(\tau) = Z_1(\tau). \quad (3)$$

На вход замкнутой системы нечеткого регулирования питания измельчительного агрегата поступает сигнал задания $Z_{3д}(\tau)$. Этот сигнал на элементе сравнения сравнивается с текущим значением регулируемого параметра $Z_2(\tau)$.

Полученный сигнал рассогласования

$$\varepsilon(\tau) = Z_{3д}(\tau) - Z_2(\tau)$$

поступает одновременно на вход дифференцирующего звена Д и после масштабирования в блоке K_1 на вход нечеткого регулятора НР.

После дифференцирования величина сигнала текущей скорости изменения сигнала рассогласования $d\varepsilon/d\tau$ масштабируется в блоке K_2 и также подается на вход НР.

Коэффициенты K_1 и K_2 необходимы для преобразования физических входных сигналов нечеткого регулятора. Эти параметры являются определяющими при синтезе нечеткого регулятора.

На выходе программно реализуемого нечеткого регулятора НР формируется нормированный управляющий сигнал $Y(\tau)$, который поступает на вход логического сигнум-реле (СР), где сравнивается с заданной величиной зоны нечувствительности ΔZ_H системы нечеткого управления.

На выходе СР формируется управляющий импульс $U(\tau) \in \{-1; 0; +1\}$, который с использованием

программного блока триггер-реверса (ТР) обеспечивает формирование текущего значения переключающей функции $\sigma(\tau)$, определяющей текущее состояние перемещения исполнительного механизма в соответствии с условием (4):

$$U(\tau) = \begin{cases} +1, & \text{если } Y \geq \frac{\Delta Z_H}{2}, \text{ то } \sigma(\tau+1) = \sigma(\tau), \\ 0, & \text{если } -\frac{\Delta Z_H}{2} < Y < \frac{\Delta Z_H}{2}, \text{ то } \sigma(\tau+1) = 0, \\ -1, & \text{если } Y \leq -\frac{\Delta Z_H}{2}, \text{ то } \sigma(\tau+1) = -\sigma(\tau). \end{cases} \quad (4)$$

Это означает, что при $U(\tau) = +1$ выбранное в текущий момент времени направление движения исполнительного механизма (изменения текущего значения $X_{BX}(\tau)$) сохраняется и на последующий $+1$ момент времени.

При $U(\tau) = 0$ в последующий момент времени $+1$ необходимо остановить исполнительный механизм, то есть принять $X_{BX}(\tau) = \text{const}$.

При $U(\tau) = -1$ выбранное на предыдущем интервале времени направление перемещения исполнительного механизма в последующий момент времени $+1$ необходимо изменить на противоположное (произвести реверс ИМ).

При использовании исполнительного механизма постоянной скорости изменение управляющего воздействия определяется выражением (5):

$$X_{BX}(\tau) = X_H + \sigma(\tau) \cdot \bar{K}_{ИМ} \cdot \tau, \quad (5)$$

где X_H — начальное (на момент включения системы нечеткого управления) значение $X_{BX}(\tau = 0)$; $\bar{K}_{ИМ}$ — постоянная средняя скорость движения исполнительного механизма.

В рассматриваемой системе нечеткий регулятор (НР) формирует управляющий сигнал $Y(\tau)$ в соответствии с принципом нечеткой логики.

Входные нормированные сигналы нечеткого регулятора обозначим как X_1 и X_2 , а нормированный выходной сигнал как $Y(\tau)$.

Введем лингвистические переменные: X_1 — "Рассогласование"; X_2 — "Скорость рассогласования"; Y — "Нормированный управляющий сигнал", где $X_1 = x_1/K_1$; $X_2 = x_2/K_2$, x_1 и x_2 — физические текущие величины входных параметров.

В области определения текущего нормированного сигнала рассогласования введем пять нечетких множеств, определяющих значения лингвистической переменной X_1 соответствующими функциями принадлежности:

$$\begin{aligned} A_1^{X_1} &= \text{"Положительное большое"}; \\ A_2^{X_1} &= \text{"Положительное малое"}; A_3^{X_1} = \text{"Нулевое"}; \\ A_4^{X_1} &= \text{"Отрицательное малое"}; \\ A_5^{X_1} &= \text{"Отрицательное большое"} \end{aligned}$$

Аналогично определим функции принадлежности для значений лингвистической переменной X_2 :

$$\begin{aligned} A_1^{X_2} &= \text{"Положительное большое"}; \\ A_2^{X_2} &= \text{"Положительное малое"}; A_3^{X_2} = \text{"Нулевое"}; \end{aligned}$$

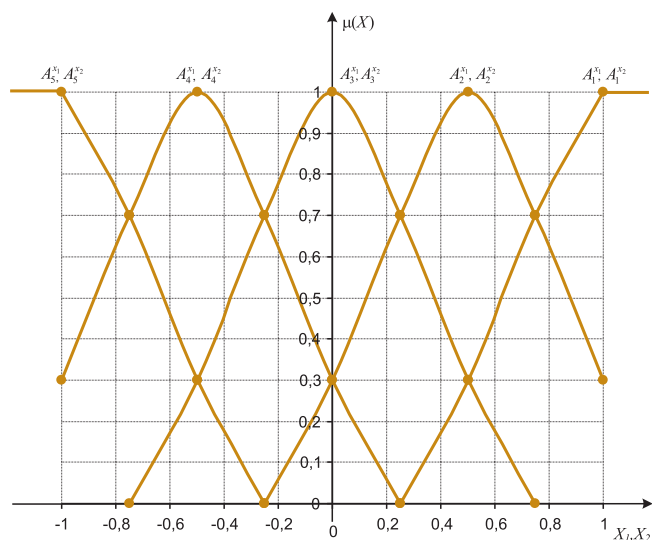


Рис. 2. Функции принадлежности нечетких множеств $\mu(X)$ для входных переменных X_1 и X_2

$A_4^{X_2}$ = "Отрицательное малое";
 $A_5^{X_2}$ = "Отрицательное большое".

Графически функции принадлежности нечетких множеств $\mu(X)$ и значения их параметров $A_1^{X_1}, A_2^{X_1}, A_3^{X_1}, A_4^{X_1}, A_5^{X_1}, A_1^{X_2}, A_2^{X_2}, A_3^{X_2}, A_4^{X_2}, A_5^{X_2}$ в зависимости от величин нормированных входных переменных X_1 и X_2 представлены на рис. 2.

Нечеткие множества значений выходной лингвистической переменной определены функциями принадлежности:

$\{B_1$ = "Положительное большое";
 B_2 = "Положительное малое";
 B_3 = "Нулевое"; B_4 = "Отрицательное малое";
 B_5 = "Отрицательное большое"}

и представлены в виде функции (6):

$$\mu^Y(x) = \delta(x-b) = \begin{cases} 1, & \text{если } x = b; \\ 0, & \text{если } x \neq b, \end{cases} \quad (6)$$

где значения параметра b для каждого значения выходной лингвистической переменной представлены в виде вектора $b = (1; 0,5; 0; -0,5; -1)^T$.

Для организации режима нечеткого управления при формировании правил используется основное эвристическое правило: "Если наблюдается рассогласование между текущими действительным и заданным значениями регулируемого параметра, тогда необходимо сформировать управляющее воздействие, обеспечивающее уменьшение текущего значения рассогласования".

Функционирование программно реализованного синтезируемого нечеткого регулятора определяется следующей базой правил (7):

$$\begin{aligned} R_1: (X_1 = A_5^{X_1}) \wedge (X_2 = A_3^{X_2}) &\rightarrow Y = B_5; \\ R_2: (X_1 = A_1^{X_1}) \wedge (X_2 = A_3^{X_2}) &\rightarrow Y = B_1; \\ R_3: (X_1 = A_4^{X_1}) \wedge (X_2 = A_3^{X_2}) &\rightarrow Y = B_4; \\ R_4: (X_1 = A_2^{X_1}) \wedge (X_2 = A_3^{X_2}) &\rightarrow Y = B_2; \\ R_5: (X_1 = A_4^{X_1}) \wedge (X_2 = A_4^{X_2}) &\rightarrow Y = B_5; \\ R_6: (X_1 = A_2^{X_1}) \wedge (X_2 = A_2^{X_2}) &\rightarrow Y = B_1; \end{aligned} \quad (7)$$

Таблица. Зависимость показателей качества переходного процесса от параметра настройки нечеткого регулятора

Параметр настройки нечеткого регулятора A	Перерегулирование $\sigma, \%$	Первое время регулирования τ_{p1}, c	Полное время переходного процесса τ_{p2}, c
150	28	212	612
250	18	216	360
350	14	218	438
450	10	223	448
500	8	228	440
550	6	230	421
600	1	240	270
650	0	520	520
700	0	560	560
1000	0	1180	1180

$$\begin{aligned} R_7: (X_1 = A_4^{X_1}) \wedge (X_2 = A_4^{X_2}) &\rightarrow Y = B_3; \\ R_8: (X_1 = A_2^{X_1}) \wedge (X_2 = A_4^{X_2}) &\rightarrow Y = B_3; \\ R_9: (X_1 = A_3^{X_1}) \wedge (X_2 = A_4^{X_2}) &\rightarrow Y = B_4; \\ R_{10}: (X_1 = A_3^{X_1}) \wedge (X_2 = A_2^{X_2}) &\rightarrow Y = B_2; \\ R_{11}: (X_1 = A_3^{X_1}) \wedge (X_2 = A_3^{X_2}) &\rightarrow Y = B_3. \end{aligned}$$

Каждое правило логически объясняет реальную ситуацию и рекомендует соответствующее действие при управлении.

Так, например, эвристическое правило R_1 можно сформулировать следующим образом: "Если скорость изменения рассогласования близка к нулю ($A_3^{X_1}$ = "Нулевое") и возникло большое отрицательное рассогласование за счет уменьшения заданного значения регулируемого параметра ($A_5^{X_1}$ = "Отрицательное большое"), то на выходе нечеткого регулятора формируется сигнал, пропорциональный максимально-му перемещению исполнительного механизма, обеспечивающему уменьшение регулируемого параметра (B_5 = "Отрицательное большое") для устранения сигнала рассогласования.

При нечетком управлении база правил (7) представляет некоторую лингвистическую модель процесса управления, являясь как бы качественной атрибутивной моделью, отражающей логику работы высококвалифицированного технолога-эксперта.

Адекватность поведения нечеткого регулятора исследовалась на компьютеризированном стенде при математическом моделировании процесса стабилизации регулируемого параметра в ходе вычислительного эксперимента.

Статические и динамические свойства стабилизируемого параметра определены заданной статической характеристикой и двумя инерционными звеньями первого порядка с постоянными времени $T_{об} = T_1 = 200$ с и $\tau_3 = T_2 = 20$ с.

Скорость исполнительного механизма составляет 0,2 % хода/с. Зона нечувствительности сигнум-реле принята равной $\Delta Z_1 = 0,02$ кг/мин.

Уравнение статической характеристики объекта управления имеет вид:

$$F(x) = 0,027X_{BX}^2 + 4,02X_{BX} + 356,7, \quad (8)$$

где X_{BX} (0; 100% хода) — управляющее воздействие, % хода (положение выходного вала исполнительного механизма).

Поскольку значения лингвистических переменных X_1 и X_2 на предметной области их определения (рис. 2) должны быть в диапазоне значений $[-1; 1]$, то вначале необходимо нормировать входные сигналы нечеткого регулятора, то есть подобрать пределы масштабирования текущих значений сигнала рассогласования и скорости изменения этого сигнала.

Правильный выбор нормирующих коэффициентов является одной из основных проблем при синтезе нечетких регуляторов.

При управлении стабилизируемыми параметрами технологического процесса основное внимание необходимо обращать на инерционные свойства автоматизируемого объекта управления и на соответствие динамическим свойствам объекта управления скорости изменения управляющего параметра (скорости движения *ИМ*). Нужно обеспечить необходимое соответствие скорости изменения регулируемого параметра и выбранной скорости исполнительного механизма.

Экспериментально было установлено, что между величиной коэффициента K_1 , нормирующего сигнал рассогласования, и скоростью *ИМ* существует линейная зависимость (9):

$$K_1 = A \cdot \bar{K}_{ИМ}, \quad (9)$$

где A — экспериментально подобранное значение параметра настройки нечеткого регулятора.

Для определения рационального значения параметра настройки нечеткого регулятора A при масштабировании сигнала рассогласования было проведено экспериментальное исследование переходных процессов в контуре нечеткого управления, в процессе которых при различных величинах масштабного параметра A оценивались показатели качества переходных процессов [3]:

- первое время регулирования τ_{p1} , характеризующее оперативность управления;
- второе время регулирования τ_{p2} , характеризующее продолжительность переходного процесса;
- максимальное значение перерегулирования σ , % от величины возмущения по заданию.

Полученные величины показателей качества переходных процессов при различных значениях параметра A при $K_{ИМ} = 0,2$ % хода/с и при постоянном однократном изменении $Z_{Зад}(\tau)$ приведены в табл. 1.

Анализ полученных результатов показывает, что при увеличении масштабного параметра A первое время t_{p1} в переходном процессе в контуре нечеткого регулятора становится более продолжительным, а уменьшение значения A приводит к появлению перерегулирования, хотя заданное значение достигается быстрее. Для инерционного с запаздыванием объекта

управления это явление вполне закономерно и не противоречит классической теории управления.

Установлено, что для принятых значений динамических параметров объекта управления и при величине $K_{ИМ} = 0,2$ % хода/с наилучшие показатели переходного процесса (табл. 1) достигаются при значении $A = 600$, принятого в дальнейших расчетах.

В производственной ситуации при использовании нечеткого регулятора наилучшее значение данного параметра зависит от динамических свойств объекта управления, выбранного *ИМ* постоянной скорости и конкретного требования к качеству переходного процесса при управлении данным приоритетным параметром технологического процесса.

Затем следует определить K_2 — нормирующий коэффициент для скорости изменения рассогласования. Если скорость изменения регулируемой величины и скорость исполнительного механизма, изменяющего X_{BX} , соизмеримы, то коэффициент K_2 , предназначенный для нормирования скорости изменения рассогласования, можно определить по формуле (10):

$$K_2 = K_{ОБ} \cdot \bar{K}_{ИМ}, \quad (10)$$

где $K_{ОБ}$ — коэффициент передачи объекта управления, который определяет количество физических единиц измерения регулируемого параметра, приходящихся на 1% хода *ИМ*; $\bar{K}_{ИМ}$ — средняя установленная скорость *ИМ*; $K_{ИМ}^{\min} \leq \bar{K}_{ИМ} \leq K_{ИМ}^{\max}$, где $K_{ИМ}^{\min}$ и $K_{ИМ}^{\max}$ соответственно минимальная и максимальная (по технической характеристике) скорости *ИМ* при условии импульсного управления движением *ИМ*. Причем продолжительность управляющего импульса не должна быть меньше $0,15 \div 0,20$ с, а минимальная продолжительность паузы между импульсами должна быть пропорциональна сумме $T_1 + T_2$ или $T_{ОБ} + \tau_3$.

Если $\bar{K}_{ИМ}$ значительно отличается от скорости изменения регулируемого параметра, то величина K_2 требует соответственной корректировки. Нецелесообразно при управлении инерционным параметром использовать быстроходный *ИМ* и наоборот.

Определенное влияние на переходный процесс оказывает и заданная зона нечувствительности нечеткого регулятора. Увеличение зоны нечувствительности ΔZ_1 приводит к увеличению статической (установившейся) ошибки, а чрезмерное уменьшение ΔZ_H приводит к возникновению периодического колебательного переходного процесса, что крайне нежелательно.

Для демонстрации режима работы нечеткого регулятора питания агрегата первичного измельчения рудного материала рассмотрим пример. До поступления возмущения по заданию управляемый процесс измельчения рудного материала находился в установившемся режиме при расходе 650 кг/мин руды в питание. Расход воды изменяется системой объемного пропорционирования расходов руда-вода, агрегат барабанного типа работает в открытом режиме прямого слива пульпы.

Период дискретизации расчета принимаем равным $\Delta t = 1$ с. Статическая характеристика процесса

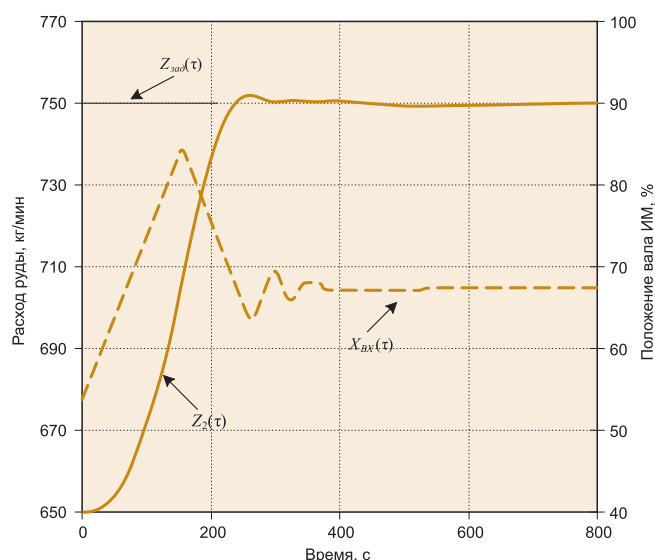


Рис. 3. Переходный процесс в системе регулирования с использованием принципов нечеткой логики:

$Z_2(\tau)$ – выходной регулируемый сигнал;

$X_{ВХ}(\tau)$ – управляющее воздействие

измельчения определяется выражением (8). В начальный момент времени при $\tau = 0$ на вход системы нечеткого управления расходом питания подается сигнал $Z_{3эл} = 750$ кг/мин.

При $F(X_{ВХ}(\tau))_{\tau=0} = 650$ кг/мин значение $X_{ВХ}(\tau)_{\tau=0} = 53,64\%$ хода. При установившемся режиме $Z_1(\tau)_{\tau=0} = Z_2(\tau)_{\tau=0} = F(X_{ВХ}(\tau))_{\tau=0} = 650$ кг/мин.

$$\varepsilon(\tau < 0) = 0, \text{ так как } Z_2(\tau < 0) = Z_{3эл}(\tau < 0);$$

$$\varepsilon(\tau = 0) = Z_{3эл}(\tau = 0) - Z_2(\tau = 0) = 750 - 650 = 100 \text{ кг/мин.}$$

При значительной инерционности

$$\left(\frac{dZ_1}{d\tau}\right)_{\tau=0} = \left(\frac{dZ_2}{d\tau}\right)_{\tau=0} = 0, \text{ т.е. } \left(\frac{d\varepsilon}{d\tau}\right)_{\tau=0} = 0.$$

$$K_1 = A \cdot \overline{K_{ИМ}} = 600 \cdot 0,2 = 120;$$

$$K_2 = K_{ОБ} \cdot K_{ИМ} = 5,6 \cdot 0,2 = 1,12;$$

$$X_1 = \frac{\varepsilon}{K_1} = \frac{100}{120} = 0,83; \quad X_2 = \frac{d\varepsilon/d\tau}{K_2} = \frac{0}{1,12} = 0.$$

При $\tau = 0$ нормированное значение сигнала рассогласования составит 0,83 нормированных единиц, а сигнал скорости изменения рассогласования будет нулевым, так как рассматриваем начальный этап процесса управления инерционным с запаздыванием параметром.

Для определения числового значения выходного управляющего сигнала Y нечеткого регулятора воспользуемся упрощенным алгоритмом формирования нечеткого вывода [2].

1. Используя графики $\mu(x)$, приведенные на рис. 2, определим значения функций принадлежности каждого входного нормированного сигнала для значений $X_1 = 0,83$ и $X_2 = 0$:

$$A_1^{X_1} = 0,77; A_2^{X_1} = 0,50; A_3^{X_1} = 0; A_4^{X_1} = 0; A_5^{X_1} = 0;$$

$$A_1^{X_2} = 0; A_2^{X_2} = 0,3; A_3^{X_2} = 1; A_4^{X_2} = 0,3; A_5^{X_2} = 0.$$

2. В качестве логического вывода используем операцию "минимум", при которой функция принадлежности вывода "отсекается" по высоте, соответствующей вычисленной степени истинности предпосылки правила (нечеткая логика "И"). Для этого необходимо в каждом правиле (7) подставить соответствующие значения функций принадлежности входных сигналов, рассчитанные ранее, а затем определить минимальное из этих значений.

$$\mu_1^P = A_5^{X_1} \wedge A_3^{X_2} = \min(0,00; 1,00) = 0,00;$$

$$\mu_2^P = A_1^{X_1} \wedge A_3^{X_2} = \min(0,77; 1,00) = 0,77;$$

$$\mu_3^P = A_4^{X_1} \wedge A_3^{X_2} = \min(0,00; 1,00) = 0,00;$$

$$\mu_4^P = A_2^{X_1} \wedge A_3^{X_2} = \min(0,50; 1,00) = 0,50;$$

$$\mu_5^P = A_4^{X_1} \wedge A_4^{X_2} = \min(0,00; 0,30) = 0,00;$$

$$\mu_6^P = A_2^{X_1} \wedge A_2^{X_2} = \min(0,50; 0,30) = 0,30;$$

$$\mu_7^P = A_4^{X_1} \wedge A_2^{X_2} = \min(0,00; 0,30) = 0,00;$$

$$\mu_8^P = A_2^{X_1} \wedge A_4^{X_2} = \min(0,50; 0,30) = 0,30;$$

$$\mu_9^P = A_2^{X_1} \wedge A_4^{X_2} = \min(0,00; 0,30) = 0,00;$$

$$\mu_{10}^P = A_3^{X_1} \wedge A_2^{X_2} = \min(0,00; 0,30) = 0,00;$$

$$\mu_{11}^P = A_3^{X_1} \wedge A_3^{X_2} = \min(0,00; 1,00) = 0,00.$$

3. Далее найдем четкое значение выходной переменной (нормированного управляющего воздействия) в соответствии с выражением (11):

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^{11} \mu_i^R}{\sum_{i=1}^{11} \mu_i^P} = \frac{\sum_{i=1}^{11} (\mu_i^P \cap \mu_i^Y)}{\sum_{i=1}^{11} \mu_i^P}, \quad (11)$$

$$Y_{\text{норм}} = \frac{\begin{bmatrix} 0 \cdot (-1) + 0,77 \cdot 1 + \\ + 0 \cdot (-0,5) + 0,5 \cdot 0,5 + \\ + 0 \cdot (-1) + 0,3 \cdot 1 + 0 \cdot 0 \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} 0 + 0,77 + 0 + 0,5 + 0 + \\ + 0,3 + 0 + 0,3 + 0 + 0 + 0 \end{bmatrix}} +$$

$$+ \frac{\begin{bmatrix} 0,3 \cdot 0 + 0 \cdot (-0,5) + \\ + 0 \cdot 0,5 + 0 \cdot 0 \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} 0 + 0,77 + 0 + 0,5 + 0 + \\ + 0,3 + 0 + 0,3 + 0 + 0 + 0 \end{bmatrix}} = 0,71.$$

Поскольку нормированное значение управляющего воздействия больше зоны нечувствительности сигнум-реле, то управляющий импульс $U_{(t=0)} = +1$, переключающая функция $\sigma_{\tau_i=+1} = \sigma_{\tau_i=1} = +1$. Это означает, что числовое значение управляющего воздействия можно рассчитать по формуле (5), представленной в виде итерации:

$$X_{ВХ_{i+1}} = X_{ВХ_i} + \sigma_i \cdot \overline{K_{ИМ}} \cdot \Delta\tau \text{ или}$$

$$X_{ВХ_{(t=1)}} = 53,64 + 1 \cdot 0,2 \cdot 1 = 53,84\% \text{ хода.}$$

На следующей итерации, при $\tau = 1$ с при положении вала ИМ, равном 53,84 % хода повторим все вычисления. Аналогично с использованием созданной рабочей программы производится расчет и для последующих итераций в зависимости от текущих значений величин рассогласования и скорости изменения рас-

согласования с использованием базы правил (7). Траектория переходного процесса, полученная путем математического моделирования системы нечеткого управления питанием предварительной стадии измельчения рудного материала с использованием принципов нечеткой логики, представлен на рис. 3.

Анализ полученного результата показывает, что нечеткий программно реализованный регулятор обеспечивает достаточно оперативное (практически без перерегулирования) управление процессом питания в режиме стабилизации заданного значения.

Выводы

Предложен новый алгоритм регулирования подачи исходного рудного материала в агрегат предварительного мокрого измельчения барабанного типа, работающего в открытом режиме. Задачей реализуемого алгоритма является обеспечение стабильной работы измельчительного агрегата в условиях неполной

информации об управляемом процессе. Упрощение настройки алгоритма регулирования позволяет отказаться от трудоемких процедур идентификации параметров объекта управления.

Проверка работы алгоритма регулирования на имитационной модели, полностью повторяющей процесс загрузки рудного материала в мельницу, при компенсации внешних возмущений показал уменьшение перерегулирования на 20% и времени регулирования на 5% по сравнению с использованием типового контура с ПИ-регулятором, настроенным по методу оптимума по модулю передаточной функции.

Список литературы

1. Батыршин И.З. Основные операции нечеткой логики и их обобщения. Казань: Отечество. 2001.
2. Круглов В.В., Дли М.И., Голунов Р.Ю. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. М.: Физматлит. 2001.
3. Фрер Р., Оргенбургер Ф. Введение в электронную технику регулирования. М.: Энергия. 1973.

Полько Павел Геннадьевич — аспирант, Логунова Оксана Сергеевна — д-р техн. наук, профессор кафедры вычислительной техники и прикладной математики, Рябчикова Елена Сергеевна — ст.преподаватель, Рябчиков Михаил Юрьевич — канд. техн. наук, Андреев Сергей Михайлович — канд. техн. наук, зав. кафедрой, Парсункин Борис Николаевич — д-р техн. наук, профессор кафедры промышленной кибернетики и систем управления ГОУ ВПО "Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова". Контактный телефон (3519) 29-85-63. E-mail: logunova66@mail.ru / pk_su@bk.ru

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ДЛЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СИНТЕЗА МЕТАНОЛА

У.Ю. Коробейникова, В.И. Федоров, Н.В. Лисицын (СПбГТИ (ТУ))

Описаны особенности разработки ПО для имитационного моделирования процесса синтеза метанола, позволяющей находить оптимальные значения технологических параметров, отслеживать снижение активности катализатора и проводить расчетные исследования.

Ключевые слова: синтез метанола, имитационное моделирование, ПО, активность катализатора.

Синтез метанола — один из широко применяемых в промышленности способов переработки углеводородного сырья и, в частности, природного газа. Ежегодно растет спрос на метанол как сырье для получения формальдегида, аминов, уксусной кислоты, растворителей и др. Важной задачей является проблема повышения технологической и экономической эффективности этого процесса.

Наряду со способами решения этой проблемы за счет внедрения новых катализаторов и совершенствования конструкций реакторных устройств большое практическое применение находит оптимизация технологических параметров процесса синтеза метанола с помощью имитационного моделирования. При этом необходимо решать следующие задачи:

- выработка оптимальной стратегии изменения технологических параметров промышленного синтеза метанола с учетом дезактивации катализатора;
- своевременное изменение технологических параметров с целью недопущения перегрева катализатора;

- определение значений составов всех потоков схемы синтеза, для оперативного принятия решения по изменению расхода продувочных газов с целью уменьшения инертов в рециркуляционном газе.

Целью настоящей работы является решение перечисленных задач для промышленного производства синтеза метанола.

Объект исследования

Процессы синтеза метанола проводятся в проточных реакторах, используемых в циркуляционной схеме. Одним из наиболее часто применяемых является реактор полочного типа с байпасом холодного газа. Катализатор в нем размещен в виде отдельных слоев, между которыми расположены устройства для распределения вводимого холодного газа. На рис. 1 представлены блок-схемы процесса синтеза.

Следует учесть, что при производстве метанола из синтез-газа наряду с синтезом метанола протекает восстановление CO_2 в CO , сопровождающееся выде-