

П.Г. ПОЛЬКО, аспирант, каф. ВТ и ПМ, ГОУ ВПО "МГТУ
им. Г.И. Носова" (г. Магнитогорск),

О.С. ЛОГУНОВА, д-р техн. наук, проф. ВТ и ПМ, ГОУ ВПО "МГТУ
им. Г.И. Носова" (г. Магнитогорск)

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ЦИФРОВЫХ КОНТУРОВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ОСНОВЕ ПРАВИЛ НЕЧЕТКОГО УПРАВЛЕНИЯ¹

Приведены результаты имитационного моделирования цифрового инерционного контура стабилизации с запаздыванием параметра технологического процесса, 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. Ил.: 3. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: имитационное моделирование, контур стабилизации, нечеткие множества, нечеткое управление.

Постановка проблемы. Проблема автоматической стабилизации параметров технологических процессов является актуальной для сложных систем, в которых параметры не являются четко определенными. К таким системам можно отнести АСУ ТП измельчения рудного материала [1 – 5]. Основными проблемами этого технологического процесса являются: высокие энергозатраты на работу электродвигателей, высокие затраты водных ресурсов при мокром измельчении, низкая эффективность дробильных агрегатов.

Анализ литературы. В [7 – 10] указываются основные направления развития систем управления технологией дробления и измельчения рудных материалов, которые позволяют оперировать косвенными параметрами процесса, такими как шум, вибрация, расход воды и т.п. При этом не рассматривается возможность строить и стабилизировать контур параметров прямого управления количеством входного материала в автоматическом режиме. Кроме того, известные математические модели стохастических процессов измельчения и классификации в гидроциклонах в значительной степени не обладают достаточной информативностью для синтеза эффективных систем автоматического управления, способных функционировать без вмешательства технологов – операторов.

Цель статьи – синтез цифрового контура автоматической стабилизации технологических параметров с применением исполнительных механизмов постоянной скорости. В работе приведены некоторые результаты по синтезу и

¹ Работа выполнена в рамках ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" 2009 – 2013 гг.

исследованию программно реализованной системы нечеткого управления подачей исходного рудного материала в агрегат предварительного мокрого измельчения барабанного типа, работающий в открытом режиме. Задачей системы является обеспечение стабильной работы измельчительного агрегата в условиях неполной информации об управляемом процессе.

Имитационная модель цифрового контура автоматической стабилизации

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 порядка с постоянными времени T_{OB} и τ_3 , где T_{OB} – характеризует инерционные, τ_3 – запаздывающие свойства процесса измельчения.

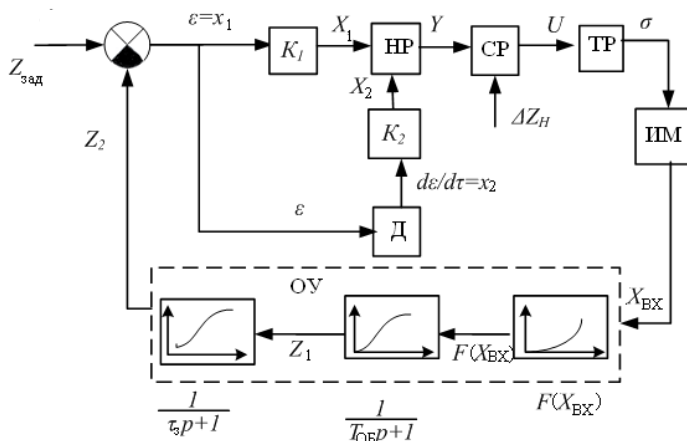


Рис. 1. Структурная схема синтезируемой замкнутой системы нечеткого управления инерционным с запаздыванием технологическим параметром

Правомерность замены передаточной функции звена запаздывания передаточной функцией инерционного звена обеспечивается соблюдением условия $T_{OB} \gg \tau_3$ [6].

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 определяется из решения уравнения (2) с использованием численного метода Эйлера:

$$T_{\text{Об}} \frac{dZ_1}{d\tau} + Z_1(\tau) = F(X(\tau)), \quad (2)$$

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 $Z_{\text{зад}}(\tau)$. Этот сигнал на элементе сравнения сравнивается с текущим значением регулируемого параметра $Z_2(\tau)$.

Полученный сигнал рассогласования $\varepsilon(\tau) = Z_{\text{зад}}(\tau) - Z_2(\tau)$ поступает одновременно на вход дифференцирующего звена Д и, после масштабирования в блоке K_1 , на вход нечеткого регулятора НР.

Сигнал рассогласования $\varepsilon(\tau)$ дифференцируется в звене Д, полученный сигнал $d\varepsilon/d\tau$ с выхода Д поступает на вход масштабирующего блока K_2 и с его выхода подается на вход блока 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):

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

Для $\sigma(\tau)$ получим

$$\sigma(\tau + 1) = \begin{cases} \sigma(\tau), & \text{если } U(\tau) = 1, \\ 0, & \text{если } U(\tau) = 0, \\ -\sigma(\tau), & \text{если } U(\tau) = -1. \end{cases}$$

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

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

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

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

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

где X_H – начальное значение $X_{ВХ}(\tau = 0)$; $\bar{K}_{ИМ}$ – 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 :

$$\begin{aligned} \{ A_1^{X_2} = \text{"Положительное большое"}; A_2^{X_2} = \text{"Положительное малое"}; \\ A_3^{X_2} = \text{"Нулевое"}; A_4^{X_2} = \text{"Отрицательное малое"}; \\ A_5^{X_2} = \text{"Отрицательное большое"} \}. \end{aligned}$$

Графически функции принадлежности нечетких множеств $\mu(X)$ и значения их параметров $A_i^{X_1}$ и $A_i^{X_2}$, где $i = \overline{1,5}$ в зависимости от величин нормированных входных переменных X_1 и X_2 представлены на рис. 2.

Нечеткие множества значений выходной лингвистической переменной Y определены функциями принадлежности:

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

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 $b = (1; 0,5; 0; -0,5; -1)^T$.

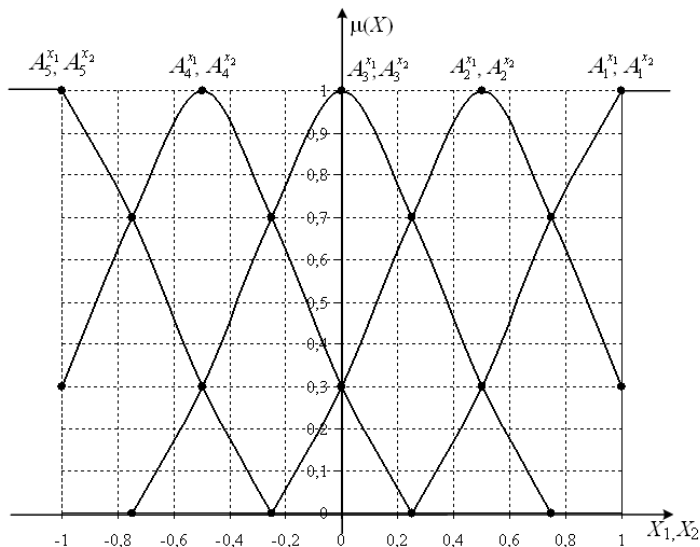


Рис. 2. Функции принадлежности нечетких множеств $\mu(X)$ для входных переменных X_1 и X_2

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):

$$\begin{aligned}
 R_1 : (X_1 = A_5^{x_1}) \wedge (X_2 = A_3^{x_2}) \rightarrow Y = B_5 ; R_2 : (X_1 = A_1^{x_1}) \wedge (X_2 = A_3^{x_2}) \rightarrow Y = B_1 ; \\
 R_3 : (X_1 = A_4^{x_1}) \wedge (X_2 = A_3^{x_2}) \rightarrow Y = B_4 ; R_4 : (X_1 = A_2^{x_1}) \wedge (X_2 = A_3^{x_2}) \rightarrow Y = B_2 ; \\
 R_5 : (X_1 = A_4^{x_1}) \wedge (X_2 = A_4^{x_2}) \rightarrow Y = B_5 ; R_6 : (X_1 = A_2^{x_1}) \wedge (X_2 = A_4^{x_2}) \rightarrow Y = B_1 ; (7) \\
 R_7 : (X_1 = A_4^{x_1}) \wedge (X_2 = A_2^{x_2}) \rightarrow Y = B_3 ; R_8 : (X_1 = A_2^{x_1}) \wedge (X_2 = A_4^{x_2}) \rightarrow Y = B_3 ; \\
 R_9 : (X_1 = A_3^{x_1}) \wedge (X_2 = A_4^{x_2}) \rightarrow Y = B_4 ; R_{10} : (X_1 = A_3^{x_1}) \wedge (X_2 = A_2^{x_2}) \rightarrow Y = B_2 ; \\
 R_{11} : (X_1 = A_3^{x_1}) \wedge (X_2 = A_3^{x_2}) \rightarrow Y = B_3 .
 \end{aligned}$$

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 ($A_5^{x_1}$ = "Нулевое") и возникло большое отрицательное рассогласование за счет уменьшения заданного значения регулируемого параметра ($A_3^{x_2}$ = "Отрицательное большое"), то на выходе нечеткого регулятора формируется сигнал, пропорциональный максимальному 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 качественной атрибутивной моделью, отражающей логику работы технолога-эксперта.

Оценка адекватности имитационной модели цифрового контура автоматической стабилизации. 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:

$$F(X_{ВХ}) = 0,27X_{ВХ}^2 + 4,02X_{ВХ} + 356,7, \quad (8)$$

где $X_{ВХ} \in (0; 100\%$ хода) – управляющее воздействие, % хода (положение выходного вала исполнительного механизма).

Поскольку значения лингвистических переменных X_1 и X_2 на предметной области их определения (см. 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 сигнала рассогласования.

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):

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

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 [6]:

- 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 $K_{\text{ИМ}} = 0,2$ % хода/с и при постоянном однократном изменении $Z_{3\Delta d}(\tau)$ приведены в табл.

Анализ полученных результатов показывает, что при увеличении масштабного параметра A первое время τ_{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.

Таблица

Зависимость показателей качества переходного процесса от параметра настройки нечеткого регулятора

Параметр настройки нечеткого регулятора A	Перерегулирование σ , %	Первое время регулирования τ_{p1} , с	Полное время переходного процесса τ_{p2} , с
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

Установлено, что для принятых значений динамических параметров объекта управления и при величине $K_{ИМ} = 0,2$ % хода/с наилучшие показатели переходного процесса (см. табл.) 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 $X_{ВХ}$, 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 $\bar{K}_{\text{ИМ}}$ 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 $\Delta\tau = 1$ с. Статическая характеристика процесса измельчения определяется выражением (8). В начальный момент времени при $\tau = 0$ на вход системы нечеткого управления расходом питания подается сигнал $Z_{\text{зад}} = 750$ кг/мин.

При $F(X_{\text{ВХ}}(\tau))|_{\tau=0} = 650$ кг/мин значение $X_{\text{ВХ}}(\tau)|_{\tau=0} = 53,64$ % хода. При установившемся режиме $Z_1(\tau)|_{\tau=0} = Z_2(\tau)|_{\tau=0} = F(X_{\text{ВХ}}(\tau))|_{\tau=0} = 650$ кг/мин. $\varepsilon(\tau < 0) = 0$, так как $Z_2(\tau < 0) = Z_{3\text{Ад}}(\tau < 0)$; $\varepsilon(\tau = 0) = Z_{3\text{Ад}}(\tau = 0) - Z_2(\tau = 0) = 750 - 650 = 100$ кг/мин.

При значительной инерционности $\left. \frac{dZ_1}{d\tau} \right|_{\tau=0} = \left. \frac{dZ_2}{d\tau} \right|_{\tau=0} = 0$, т.е. $\left. \frac{d\varepsilon}{d\tau} \right|_{\tau=0} = 0$.

При этом получим $K_1 = 120$; $K_2 = 1,12$; $X_1 = 0,83$ и $X_2 = 0$.

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 U 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 $X_2 = 0$:

$$A_1^{x_1} = 0,77; A_2^{x_1} = 0,50; A_3^{x_1} = 0; A_4^{x_1} = 0; A_5^{x_1} = 0;$$

$$A_1^{x_2} = 0; A_2^{x_2} = 0,30; A_3^{x_2} = 1; A_4^{x_2} = 0,3; A_5^{x_2} = 0.$$

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:

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

Аналогично получим: $\mu_2^P = 0,77$; $\mu_3^P = 0$; $\mu_4^P = 0,5$; $\mu_5^P = 0$; $\mu_6^P = 0,3$; $\mu_7^P = 0$; $\mu_8^P = 0,3$; $\mu_9^P = 0$; $\mu_{10}^P = 0$; $\mu_{11}^P = 0$.

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

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

Для рассчитанных значений μ получаем $Y_{\text{норм}} = 0,71$.

Поскольку нормированное значение управляющего воздействия больше зоны нечувствительности сигнум-реле, то управляющий импульс $U|_{\tau=0} = +1$, переключающая функция $\sigma_{\tau_i=+1} = +1$. Это означает, что числовое значение управляющего воздействия можно рассчитать по формуле (5), представленной в виде итерации $X_{\text{ВХ}_{i+1}} = X_{\text{ВХ}_i} + \sigma_i \cdot \bar{K}_{\text{ИМ}} \cdot \Delta\tau$ или $X_{\text{ВХ}_{\tau=1}} = 53,84\%$ 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 рассогласования с использованием базы правил (7). Траектория переходного процесса, полученная путем математического моделирования системы нечеткого управления питанием предварительной стадии измельчения рудного материала, представлена 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.

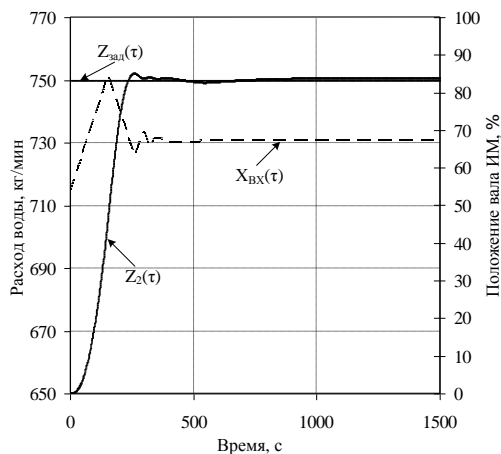


Рис. 3. Переходный процесс в системе регулирования с использованием принципов нечеткой логики

Выводы:

1. Предложен новый алгоритм управления, использующий нечеткие логические выводы и позволяющий оперативно стабилизировать параметр технологического процесса в условиях неполной информации об управляемом процессе.

2. Проверка работы алгоритма регулирования на имитационной модели, полностью повторяющей процесс загрузки рудного материала в мельницу, при изменении задания контура системы нечеткого управления 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 / И.З. Батыршин. – Казань: Отечество. – 2001. – 234 с. 2. Круглов В.В. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети / В.В. Круглов, М.И. Дли, Р.Ю. Голунов. – М.: Физматлит. – 2001. – 163 с. 3. Круглов В.В. Интеллектуальные информационные системы: компьютерная поддержка систем нечеткой логики и нечеткого вывода / В.В. Круглов, М.И. Дли. – М.: Физматлит. – 2002. – 381 с. 5. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – М.: Физматлит. – 2005. – 281 с. 6. Фрер Р. Введение в электронную технику регулирования / Р. Фрер, А. Оргенбургер. – М.: Энергия. – 1973. – 159 с. 7. Кривоносов В.А., Тараненко М.Е. Управление процессом измельчения руды на основе регулятора состояния с наблюдателем Луенберга / В.А. Кривоносов, М.Е. Тараненко // Вестник Воронежского государственного технического университета. – Воронеж. – 2008. – № 4. – С. 132 – 135. 8. Иванов В.Ю. Обоснование параметров магнитно-импульсного разупрочнения коренных золотосодержащих руд при их рудоподготовке: дис. ... кандидата техн. наук: 25.00.20 / Иванов Виталий Юрьевич. – М., 2009. – 148 с. 9. Пат. 2149062 Россия, МПК В02С25/00. Способ управления процессом измельчения / Попов В.П., Щупановский В.Ф., Попов Е.В.; заявитель и патентообладатель ОАО «Лебединский горно-обогатительный комбинат». – № 98121106/03; заявл. 18.11.1998; опубл. 20.05.2005. Бюл. № 7. 10. Лобко В.В. Автоматизация технологического процесса

измельчения руды на сильвинитовой обогатительной фабрике / В.В. Лобко, В.С. Мыслейко, А.П. Кузнецов // Доклады БГУИР. – 2006. – № 4 (16). – С. 59 – 63.

Статья представлена д.т.н. проф., проректором по научной работе ГОУ ВПО "МГТУ им. Г.И. Носова" Вдовиным К.Н.

УДК 658.512.011.56:519.87

Імітаційна модель цифрових контурів автоматичної стабілізації технологічних параметрів на основі правил нечіткого управління / Полько П.Г., Логунова О.С. // Вісник НТУ "ХПІ". Тематичний випуск: Інформатика і моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2010. – № 31. – С. 133 – 144.

Приведені результати імітаційного моделювання цифрового контура стабілізації інерційного із запізнюванням параметра технологічного процесу, синтезованого з використанням нечіткої множини і нечітких логічних виводів, здатного ефективно функціонувати в умовах неповної інформації про керований параметр. Показані переваги нечіткого управління, що використовує спрощені математичні моделі технологічних об'єктів управління. Іл.: 3. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: імітаційне моделювання, контур стабілізації, нечітка множина, нечітке управління.

UDK 658.512.011.56:519.87

Imitating model of digital contours of automatic stabilization of technological parameters on the basis of rules of indistinct management / Pol'ko P.G., Logunova O.S. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2010. – № 31. – P. 133 – 144.

Results of imitating modelling of a digital inertial contour of stabilisation with delay of parametre of the technological process synthesised with use of indistinct sets and indistinct logic conclusions are resulted, capable effectively to function in the conditions of the incomplete information on the operated parametre. Advantages of the indistinct management using simplified mathematical models of technological objects of management are shown.. Figs.: 3. Refs.: 10 titles.

Keywords: imitation design, stabilizing contour, fuzzy sets, unclear management.

Поступила в редакцію 15.05.2010