Интеллектуальные системы
2003. № 1(5)

УДК 6283.621.3

© 2003 г. **Е.П. Иванкова**,
В.Г. Косицын,
В.А. Соловьев, канд. техн. наук,
С.П. Черный
(Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет)

ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ФУНКЦИЙ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ ПРИ СИНТЕЗЕ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМИ ПРОЦЕССАМИ

Рассмотрен графо-аналитический метод синтеза параметров нечеткого регулятора на основе функций отображения. Приведено обоснование его реализации для систем управления тепловыми процессами. Применение метода синтеза регулятора проиллюстрировано на примере.

Объекты регулирования, осуществляющие тепловые технологические процессы, характеризуются существенной нелинейностью, наличием запаздываний и значительной инерционностью звеньев регулирования. При этом математическое описание таких систем можно выполнить только в упрощенном виде, т.к. ряд параметров технологических процессов не поддается контролю. Взаимодействие между параметрами может быть выражено приближенной зависимостью, величина транспортного запаздывания определяется только приближенно на основании экспериментальных данных. Иными словами, данные технологические процессы могут быть описаны в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t-\tau) + B(t)u(t) + G(t)w(t-\theta) + H(x(t)),$$

где A – матрица системы; B – матрица управления; G – матрица возмущений; H – нелинейность, обусловленная некоторыми параметрами системы; x – координаты состояния системы; u – сигнал управления; w – возмущающее воздействие; τ – величина запаздывания, обусловленная внутренними параметрами объекта управления; θ – величина запаздывания, обусловленная внешними возмущающими воздействиями.

Поскольку в силу перечисленных причин ряд параметров объекта управления характеризуется неполной и нечеткой информацией, то для таких систем управления целесообразно использовать нечеткий подход, т.е. для формирования требуемого закона управления используем нечеткий логический регулятор (НЛР).

Как известно, функционирование НЛР по принципу Мамдани реали-

зуется на основе трех основных этапов: фаззификация, база знаний (БЗ), дефаззификация (рис. 1).

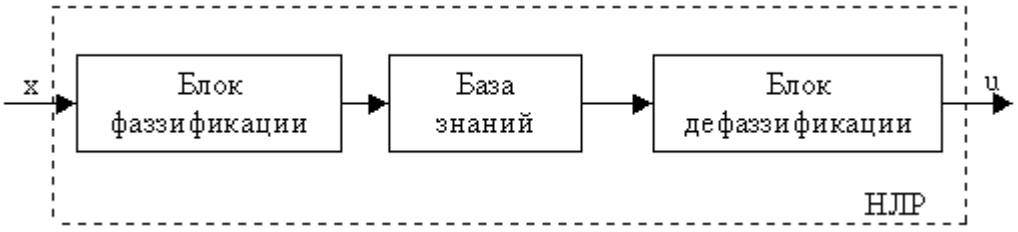

Рис. 1. Блок-схема НЛР.

На рис. 1 представлена блок-схема НЛР, где x – вектор переменных состояния объекта управления, или вектор составляющих ошибки регулирования. Блок фаззификации выполняет функции по преобразованию численных значений входных переменных в нечеткое множество.

При таком синтезе НЛР определению подлежат параметры блока фаззификации (вид, число, распределение ФП), БЗ (количество, вид правил) и параметры блока дефаззификации. Классический подход синтеза НЛР предусматривает участие специалиста (эксперта) в определении параметров регулятора или использовании итерационного принципа их отыскания.

В статье рассматривается метод синтеза НЛР, обеспечивающий автоматизацию процесса настройки одного из блоков регулятора.

Продукционные правила в случае с n-мерным входом и одномерным выходом для НЛР могут быть записаны в виде:

Посылка: Если x_1 есть $A^m{}_1$ и … и x_n есть $A^m{}_n$.

Правило: Если x_1 есть $A^1{}_1$ и … и x_n есть $A^1{}_n$ то u есть B^1.

Вывод: u есть $B^{'}$,

где $[x_1, x_2, ..., x_n]^T = \bar{x}$ – вектор входного сигнала; u – скалярная величина сигнала управления. X_i является универсумом для каждой лингвистической переменной x_i, а U – соответственно универсумом u. Обозначая значения i-х лингвистических переменных x_i и u через $A^j{}_i$ и B^j $j = \overline{1,m}$ соответственно, получим значения функции принадлежности

$$\mu_{A_i^j}(x) : X_i \to [0,1] \text{ и } \mu_{B^j}(u) : U \to [0,1].$$

Нечеткое отношение для каждого продукционного правила определяется следующим образом:

$(A^j{}_1$ и $A^j{}_2$ и … и $A^j{}_n) \to B^j$,

$$\mu_{R^j}(x_1, x_2, ..., x_n, u) = \mu_{A_1^j}(x_1)\mu_{A_2^j}(x_2)...\mu_{A_n^j}(x_n)\mu_{B^j}(u);$$

нечеткое отношение R для m правил определяется согласно выражению:

$$\mu_R(x_1, x_2, ..., x_n, u) = \max_{j=1}^{m} \mu_{R^j}(x_1, x_2, ..., x_n, u).$$

В случае, когда лингвистические переменные входного сигнала x_i

принимают нечеткие множества $A_i^{'}, i=\overline{1,n}$, нечеткое множество $B^{'}$ лингвистической переменной сигнала управления определяется при помощи нечеткой импликации. Функция принадлежности для $B^{'}$ имеет вид:

$$\mu_{B^{'}}(u)=\max_{x_1,x_2,\ldots,x_n}\left\{\left[\prod\mu_{A_i^{'}}(x_i)\right]\cdot\left[\max_{j=1}^{n}\left[\prod_{i=1}^{n}\mu_{A_i^{j}}(x_i)\right]\cdot\mu_{B^{j}}\right]\right\}.$$

Пусть нечеткие подмножества B^{j} имеют вид:

$$\mu_{B^{'}}(u)=\begin{cases}1, & u=\lambda^{j},\\ 0, & u\neq\lambda^{j},\end{cases}$$

где λ^{j} – дискретные численные значения выходного сигнала. Тогда с учетом этого:

$$\mu_{B^{'}}(u)=\begin{cases}\prod_{i=1}^{n}\mu_{A_i^{j}}(x_i), & u=\lambda^{j},\\ 0, & u\neq\lambda^{j}.\end{cases}$$

На этапе дефаззификации, применяя метод центральной площади, получим выражение, определяющее значение выходного сигнала:

$$u=\frac{\sum_{j=1}^{m}\lambda^{j}\left[\prod_{i=1}^{n}\mu_{A_i^{j}}(x_i)\right]}{\sum_{j=1}^{m}\prod_{i=1}^{n}\mu_{A_i^{j}}(x_i)}.$$

Обозначим:

$$\zeta_j(\bar{x})=\frac{\prod_{i=1}^{n}\mu_{A_i^{j}}(x_i)}{\sum_{j=1}^{m}\prod_{i=1}^{n}\mu_{A_i^{j}}(x_i)},$$

тогда формула определения выходного сигнала НЛР (сигнала управления) будет иметь вид:

$$u(\bar{x},\bar{\lambda})=\sum_{j=1}^{m}\lambda^{j}\zeta_j(\bar{x})=\bar{\lambda}^{T}\zeta(\bar{x}).$$

Таким образом, в случае полноты и непротиворечивости БЗ, согласно полученному выражению, НЛР может быть описан в виде произведения двух функций, определяемых видом и распределением по диапазону регулирования функций принадлежности и выбранным алгоритмом нечеткого вывода.

Если положить, что объект управления описывается упрощенными математическими выражениями и известны критерии оптимизации, то можно найти выражение для желаемого управляющего воздействия, обес-

печивающего требуемые показатели качества. В общем виде функционал качества, на основании которого может быть получено требуемое управляющее воздействие, имеет вид [1]:

$$J = \int_0^{\infty} \left[m^2 \gamma^2(\Psi) + c^2 \dot{\Psi}^2(t) \right] dt,$$

где m, c – постоянные коэффициенты; $\Psi(t)$ – произвольная дифференцируемая или кусочно-непрерывная функция и $\Psi(0) = 0$; $\gamma(\Psi)$ – однозначная, непрерывная, дифференцируемая $\forall\Psi$ функция, причем $\gamma(0) = 0$ и $\gamma(\Psi) \cdot \Psi < 0$ при $\forall\Psi \neq 0$.

Минимизация данного функционала требует от НЛР реализации выходного сигнала вида:

$$u = -\frac{1}{b} \left[\frac{\partial \Psi(\bar{x})}{\partial x_n} \right]^{-1} \left[\frac{1}{T} \gamma(\Psi) + \sum_{k=1}^{n} \frac{\partial \Psi(\bar{x})}{\partial x_k} f_k(\bar{x}) \right].$$

Если считать, что база знаний полна и непротиворечива, то НЛР позволяет реализовать закон управления, максимально приближенный к требуемому и зависящий от $\bar{\lambda}$ и $\zeta(\bar{x})$. Если считать, что вектор $\bar{\lambda} = const$, то синтез НЛР должен сводиться к оптимальному распределению функций принадлежности при их фиксированном числе.

Поскольку распределение ФП по диапазону регулирования описывается логическими элементами, то для синтеза НЛР целесообразно использовать графо-аналитический математико-логический подход с применением универсальной шкалы [2].

Задача синтеза должна сводиться к отысканию такого вида и формы ФП, которые при приведенных выше допущениях обеспечивали бы, на основании принятого алгоритма нечеткого вывода, требуемый вид управляющего воздействия. При известном управляющем воздействии, заданном входном сигнале регулирования задача будет заключаться в нахождении желаемой функции отображения [2].

Для поиска функции отображения введем следующие ограничения:

1. Будем считать, что реализация желаемого закона управления осуществляется по одному входному сигналу НЛР. Второй входной сигнал НЛР может быть учтен впоследствии как корректирующий.
2. Поскольку для практически используемых устойчивых систем управления технологическими процессами вид динамических переходных характеристик может быть сведен к двум типам – апериодическому и колебательному – дальнейшие рассуждения будем проводить для этих случаев.

Для доказательства этого рассмотрим систему координат рис. 2, правая часть которой представляет собой единичный квадрат $x \to [0;1]$ и $y \to [0;1]$.

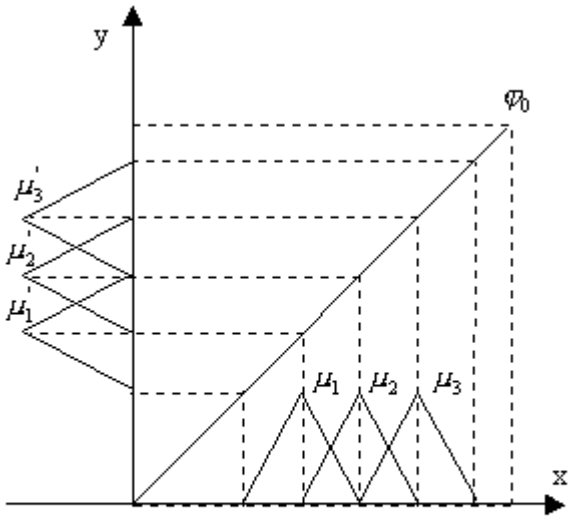

Рис.2. Обобщенная координатная система.

Правую часть приведенной координатной системы представим при помощи единичного квадрата. Диагональ этого квадрата является базовой функцией отображения φ_0, или осью отображения, при которой равномерно распределенные по оси абсцисс ФП, отражаясь на ось ординат, не претерпевают никаких изменений. Пусть спрогнозированный или полученный из каких-либо других соображений выходной сигнал НЛР, являющийся сигналом управления, имеет вид рис. 3 a, b.

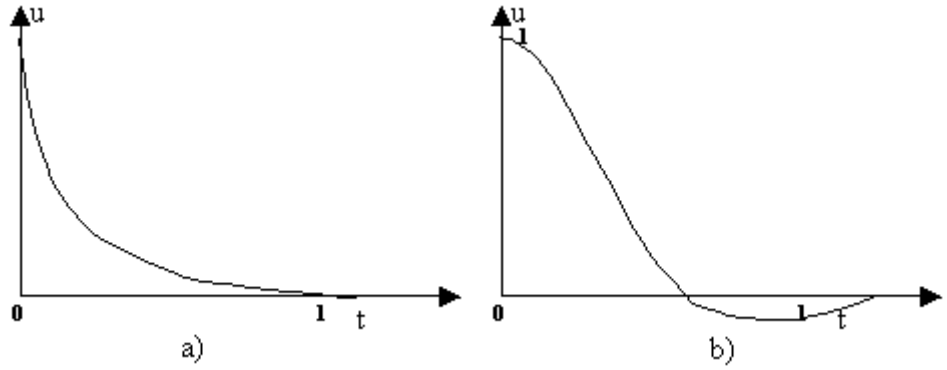

Рис. 3. Законы управления.

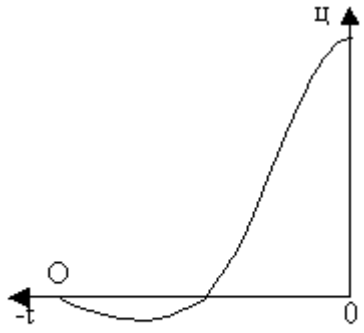

Рис.4. Преобразованный сигнал управления.

Преобразуем сигнал управления, например, b), в функцию вида $\varphi = u(-t)$, что соответствует прохождению сигнала управления сквозь структуру НЛР в обратном направлении (рис. 4).

С учетом того, что выходной сигнал НЛР в конце переходного процесса стремится к нулю, функция отображения должна стремиться к своему максимальному значению. Сориентируем данную функцию в правой части таким образом, чтобы касательная к точке О определила угол поворота координатной системы ц-функции отображения. Такой касательной является ось абсцисс (рис. 5).

Приведенный вид функции отображения изменит равномерно распределенные ФП на заданном диапазоне, концентрируя их в окрестности нуля и соответственно растягивая их в крайних пределах диапазона.

Поскольку в окрестности начала координат синтезируемые ФП стягиваются в линию, то процесс их построения (при количестве ФП больше

9) целесообразно завершить при попадании значения x' в зону, соответствующую классической зоне завершения переходного процесса. С другой стороны, применение большого числа ФП (≥ 9) является неоправданным, т.к. приводит к значительному росту алгоритмической сложности НЛР и обрабатываемой информации.

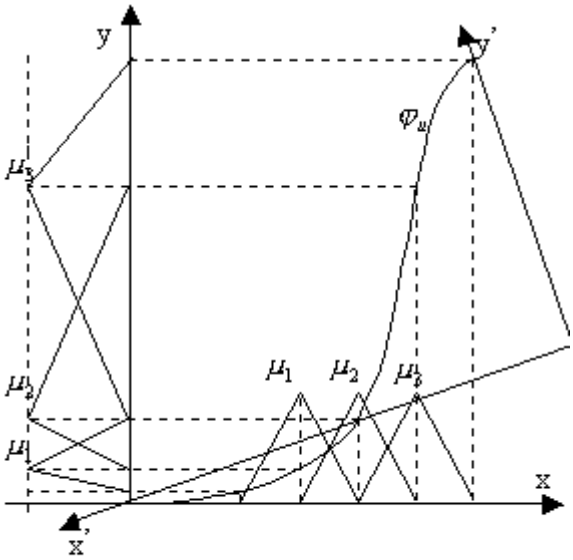

Рис.5. Координатная система отражения функций принадлежности.

Для доказательства правильности рассуждений, смоделируем переходные процессы в системах регулирования, объекты управления которых описываются колебательными и апериодическими законами при стандартном равномерном распределении ФП и синтезированном при помощи рассмотренного выше метода.

Пример

Для примера рассмотрим объект – мобильную углевыжигательную установку. Данный объект описывается системой дифференциальных уравнений [3]:

$$\dot{x}_1(t) = \frac{-1}{T_1} \cdot x_1(t) + \frac{K_1}{T_1} \cdot x_{вх}(t - \tau_1);$$

$$\dot{x}_2(t) = \frac{K_2}{T_2} \cdot x_1(t) - \frac{1}{T_2} \cdot x_2(t);$$

$$\dot{x}_3(t) = \frac{K_3}{T_3} \cdot x_2(t - \tau_3) - \frac{1}{T_3} \cdot x_3(t);$$

$$\dot{x}_4(t) = \frac{K_2}{T_2} \cdot x_3(t) - \frac{1}{T_2} \cdot x_4(t)$$

$$\dot{x}_5(t) = \frac{K_4}{T_4} \cdot x_4(t - \tau_4) - \frac{1}{T_4} \cdot x_5 + \frac{K_4}{T_4} \cdot x_{17}(t - \tau_4);$$

$$\dot{x}_6(t) = \frac{K_{11}}{T_{11}} \cdot x_4(t) - \frac{1}{T11} \cdot x_6(t) + \frac{K_{11}}{T_{11}} \cdot x_{17}(t);$$

$$\dot{x}_7(t) = \frac{K_{10}}{T_{10}} \cdot x_6(t - \tau_{10}) - \frac{1}{T_{10}} \cdot x_7(t);$$

$$\dot{x}_8(t) = \frac{K_{10}}{T_{10}} \cdot x_7(t - \tau_{10}) - \frac{1}{T_{10}} \cdot x_8(t);$$

$$\dot{x}_9(t)=\frac{K_9}{T_9}\cdot x_1(t)-\frac{1}{T_9}\cdot x_9(t);$$

$$\dot{x}_{10}(t)=\frac{K_{12}}{T_{12}}\cdot x_8(t)+\frac{K_{12}}{T_{12}}\cdot x_9(t)-\frac{1}{T_{12}}\cdot x_{10}(t);$$

$$\dot{x}_{11}(t)=\frac{K_{12}}{T_{12}}\cdot x_{10}(t)-\frac{1}{T_{12}}\cdot x_{11}(t);$$

$$\dot{x}_{12}(t)=\frac{K_{13}}{T_{13}}\cdot x_{11}(t)-\frac{1}{T_{13}}\cdot x_{12}(t);$$

$$\dot{x}_{13}(t)=\frac{K_6}{T_6}\cdot x_2(t-\tau_6)-\frac{1}{T_6}\cdot x_{13}(t);$$

$$\dot{x}_{14}(t)=\frac{K_7}{T_7}\cdot x_7(t-\tau_7)-\frac{1}{T_7}\cdot x_{14}(t);$$

$$\dot{x}_{15}(t)=\frac{K_8}{T_8}\cdot x_{10}(t-\tau_8)-\frac{1}{T_8}\cdot x_{15}(t);$$

$$\dot{x}_{16}(t)=\frac{K_5(1-e^{\frac{t}{T}})}{T_5}\cdot x_1(t-\tau_5)\cdot H(x)-\frac{1}{T_5}\cdot x_{16}(t);$$

$$\dot{x}_{17}(t)=\left(\frac{K_5(1-e^{\frac{t}{T}})}{T_5}\cdot x_{13}(t-\tau_5)+\frac{K_5(1-e^{\frac{t}{T}})}{T_5}\cdot x_{14}(t-\tau_5)+\frac{K_5(1-e^{\frac{t}{T}})}{T_5}\cdot x_{15}(t-\tau_5)+\right.$$

$$\left.+\frac{K_5(1-e^{\frac{t}{T}})}{T_5}\cdot x_{16}(t-\tau_5)+\frac{K\cdot K_5(1-e^{\frac{t}{T}})}{T_5}\cdot u(t-\tau_5)\right)\cdot H(x)-\frac{1}{T_5}\cdot x_{17}(t),$$

$$H(x)=\begin{cases}\dfrac{b}{a}\cdot x, -a\le x<a,\\ b, x\ge a\end{cases}$$

где x_i – координаты состояния системы (i=1, 2,.., 17); u – входной сигнал; T_l, K_l, τ_j – постоянная времени, коэффициент передачи и величина запаздывания соответственно (j=1, 2,…, 9; l=1, 2,…, 13); $H(x)$ – функционал, описывающий нелинейное звено, в нашем случае ограничение; a, b – параметры нелинейного звена.

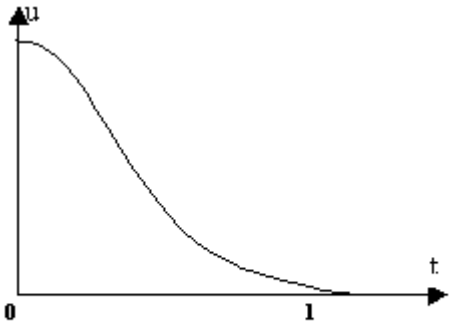

Рис. 6. Вид управляющего воздействия.

Принимая во внимание особенности объекта регулирования – его высокую инерционность и линейно нарастающую форму его входного сигнала $x_{вх}$ – определим вид управляющего воздействия (рис. 6).

Будем считать, что на первом этапе синтеза рассматриваемый объект линеен и стационарен. Учитывая принятые допущения, применим предлагаемый метод для синтеза параметров НЛР.

В нашем случае функционал, обеспечивающий вид управляющего воздействия, показанного на рис. 6, имеет вид:

$$J = \int_0^{\infty} (e^2(t) + \dot{e}^2(t))dt .$$

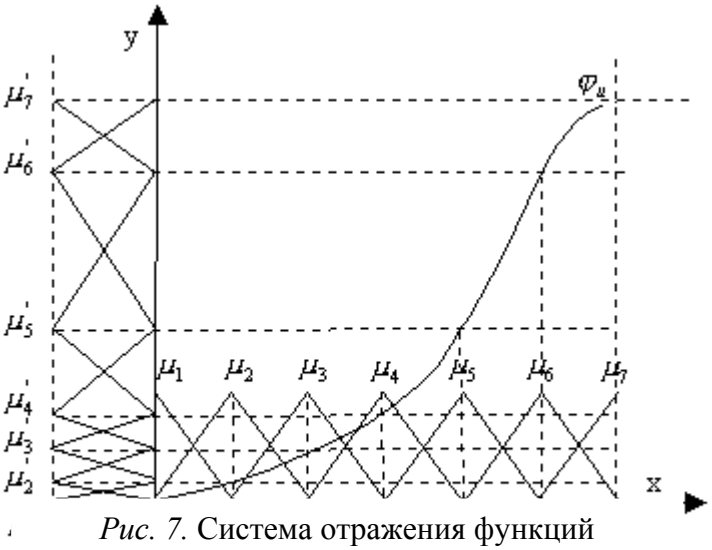

Рис. 7. Система отражения функций принадлежности.

Используя описанный выше метод, получим функцию отображения для синтеза ФП блоков фаззификации и дефаззификации.

Отражая равномерно распределенные ФП относительно полученной функции распределения определим их необходимый вид рис. 7 (при построении синтезируемые ФП аппроксимируются треугольным видом) для упрощения дальнейшего использования их в НЛР при моделировании в среде MatLab.

На рис. 8 и рис. 9 приведены переходные процессы в углевыжигательной установке.

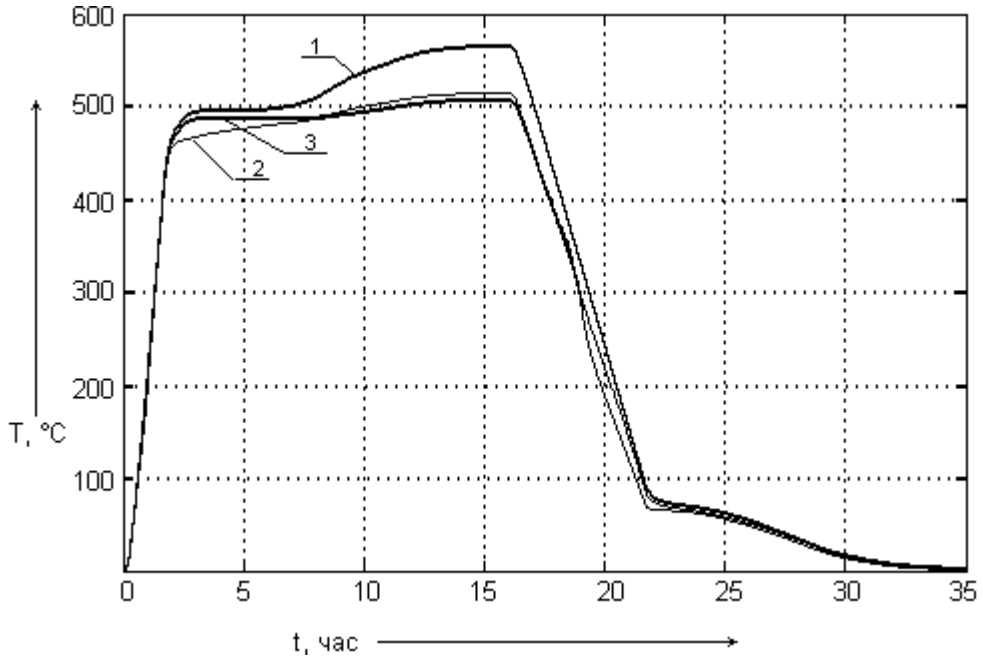

Рис.8. Переходные процессы в углевыжигательной установке.

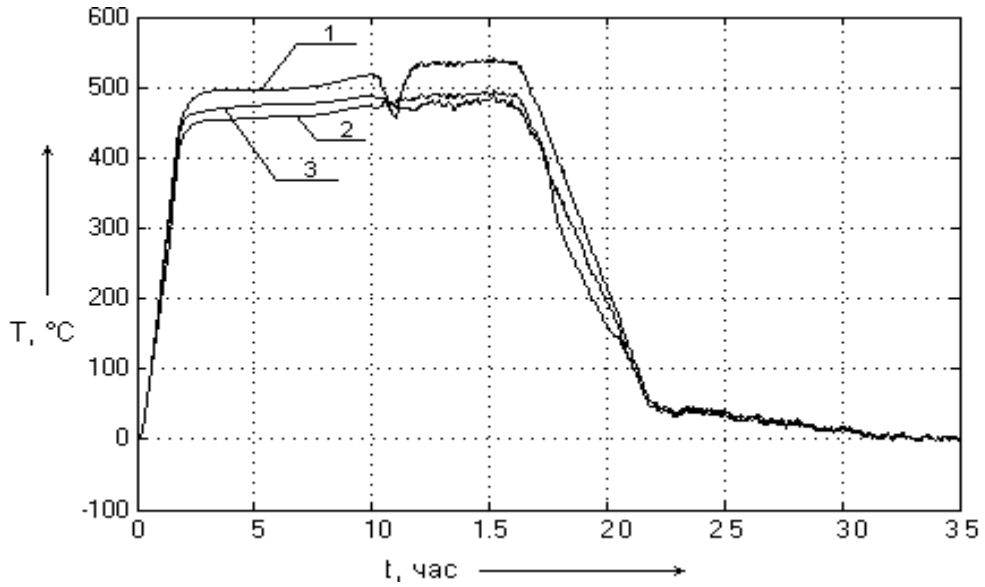

Рис. 9. Переходные процессы в углевыжигательной установке при подаче внешнего возмущения.

На рис. 8 рассматривается линейный стационарный объект управления, а на рис. 9 – этот же объект, но уже с учетом нелинейности и нестационарности его параметров, а также при наличии в системе возмущающих воздействий. Кривые, показанные на рисунках, соответствуют: 1 – системе без НЛР; 2 – системе с НЛР и равномерно распределенными ФП; 3 – системе с НЛР и ФП распределенными по описанному выше методу.

Сравнительный анализ моделирования нечеткой системы регулирования углевыжигательной печью с регулятором, синтезированным по предлагаемому методу и регулятором с равномерно распределенными ФП, при полной БЗ показал, что данный метод действительно позволяет оптимизировать переходные процессы в системе и как следствие повысить качество выходной продукции. В приведенных графиках наглядно прослеживается снижение величины температурного рассогласования на этапе экзотермического процесса. Кроме того, исследование данной системы при изменении параметров объекта регулирования – таких как плотность древесины, ее влажность в диапазоне 15-20% – не оказывает существенного влияния на выходные характеристики системы. При использовании НЛР с равномерным распределением ФП данный диапазон адаптации нечеткой системы сужается до 8-10%. Кроме того, оптимальное распределение ФП в блоках фаззификации и дефаззификации позволяет существенно сократить объем БЗ путем исключения из нее правил, не оказывающих существенного влияния на выходные характеристики НЛР.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Колесников А.А.* Синергетическая теория управления. М.: Энергоатомиздат, 1994.

2. *Поспелов Д.А.* Ситуационное управление: теория и практика. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986.
3. *Бакаев В.В.* К вопросу разработки математической модели тепловых процессов в углевыжигательных установках // Вестник Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Вып. 2. Сб. 1. Ч. 3. Прогрессивные технологии в машиностроении, 2000. С. 98-111.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Чье Ен Уном.