

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

УДК 007 : 159.955 + 681.3.06 + 621.182.52

Е. П. Бакулин, В. Д. Бобко, Ю. Н. Золотухин, М. А. Золотухина,
А. А. Нестеров, В. Я. Пивкин, М. Н. Филиппов, А. П. Ян

(Новосибирск)

УПРАВЛЕНИЕ ПОДАЧЕЙ ВОЗДУХА В ТОПКУ ПАРОВОГО КОТЛА
НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Предложена нечеткая система оптимизации процесса сжигания газового топлива для многорелочного котлоагрегата с индивидуальным контролем факела каждой горелки и отдельным управлением подачей воздуха в каждую горелку. Представлены результаты моделирования различных режимов системы управления.

Введение. Традиционные методы оптимизации качества сжигания топлива в теплоэнергетических установках основаны на измерении мгновенных значений расходов воздуха $G_{\text{air}}(t)$, топлива $G_{\text{fuel}}(t)$, теплоты сгорания топлива $Q_{\text{fuel}}(t)$ и управлении расходом воздуха [1]. Типовая схема системы управления подачей воздуха в топку котла, работающего на жидком либо газообразном топливе, приведена на рис. 1; на пылеугольных котлах, ввиду отсутствия приборов для измерения текущего расхода топлива и теплоты его сгорания, применяется схема, основанная на регулировании содержания кислорода в уходящих газах.

Реализуемые в настоящее время методы управления процессом горения используют результаты измерений, отражающие работу теплоэнергетической установки в целом, и не учитывают возможные отклонения в работе отдельных горелочных устройств, число которых на крупных котлоагрегатах может достигать нескольких десятков. Известно, что большая часть вредных продуктов образуется непосредственно в горящем факеле и при дальнейшем продвижении в котле может остаться неизменной. Поэтому даже при соответствии средних параметров расчетным значениям возможны отклонения от оптимальных значений на отдельных горелочных устройствах, приводящие к выбросам вредных продуктов.

Таким образом, для повышения экономичности и улучшения экологических показателей теплоэнергетических установок существует реальная потребность создания системы управления подачей воздуха в топку, основанной на оценке параметров функционирования каждой горелки котлоагрегата.

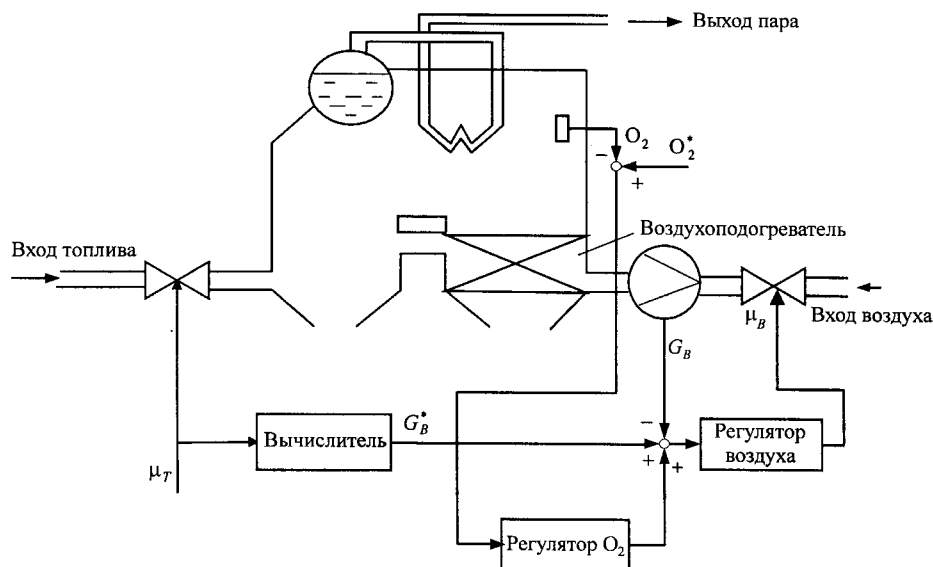


Рис. 1. Типовая схема системы управления расходом воздуха

В данной работе представлены результаты исследования проблемы управления процессом сжигания топлива и предложения по созданию системы автоматического управления горелками, основанной на использовании оптико-электронных датчиков пламени [2] и методов нечеткой логики [3–6]. Представленный материал изложен следующим образом. В разд. 1 приведены результаты анализа сигналов датчика пламени в различных режимах работы горелки; разд. 2 посвящен алгоритмам нечеткого управления. В разд. 3 представлены схемы нечеткого управления отдельной горелкой и многорелочным котлом. Разд. 4 содержит результаты моделирования предложенной системы управления в среде MATLAB-SIMULINK.

1. Анализ сигналов датчика пламени. В качестве основного способа повышения технико-экономических показателей котла использовано раздельное управление подачей воздуха в каждую горелку, т. е. управление коэффициентом избытка воздуха $\alpha = V/V_0$, где V – объем воздуха, фактически подаваемого в горелку, и V_0 – теоретически необходимый объем воздуха для оптимального сгорания топлива. Оптимальное значение α_{opt} для котла, работающего на газовом топливе, лежит в диапазоне 1,06–1,2. При отклонении α от оптимального значения технико-экономические показатели котла снижаются.

Для реализации раздельного управления процессом сжигания топлива в многорелочном котлоагрегате использован набор датчиков пламени, контролирующих спектральный состав пламени факела каждой из горелок в двух диапазонах волн: 400–1100 (рис. 2, а) и 1100–1800 нм (рис. 2, б). На рисунке отображена реакция (выходные сигналы датчика пламени одной горелки [7]) на последовательность событий:

- от момента начала регистрации до $\cong 3000$ отсчетов: режим горения *Норма* (I) ($\alpha \cong \alpha_{opt}$);
- от $\cong 3000$ до $\cong 10000$ отсчетов: уменьшен объем подаваемого воздуха относительно режима *Норма* – режим *Недожог* (II) ($\alpha < \alpha_{opt}$);

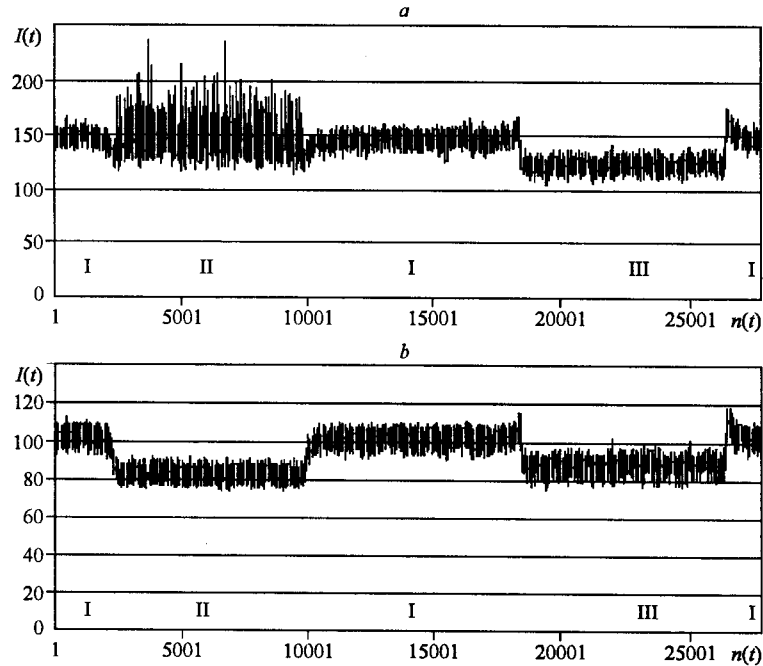


Рис. 2. Форма сигналов оптико-электронного датчика

- от $\cong 10000$ до $\cong 18000$ отсчетов: возврат к режиму *Норма*;
- от $\cong 18000$ до $\cong 27000$ отсчетов: подача избыточного объема воздуха – режим *Пережог* (III) ($\alpha > \alpha_{\text{opt}}$);
- от $\cong 27000$ отсчетов до конца регистрации: режим *Норма*.

Анализ представленных сигналов оптико-электронного датчика пламени приводит к выводу, что существенная информация о режимах работы горелки содержится в статистических параметрах сигналов, а именно в скользящих средних значениях и дисперсиях сигналов. Результаты обработки сигналов датчика в диапазонах 400–1100 и 1100–1800 нм представлены в таблице.

Из таблицы видно, что по сравнению с режимом *Норма* в режиме *Недожог* среднее значение $M(\text{Si})$ и дисперсия $D(\text{Ge})$ практически не изменяются, дисперсия $D(\text{Si})$ значительно возрастает, а среднее значение $M(\text{Ge})$ существенно уменьшается. В режиме *Пережог* по сравнению с режимом *Норма*

| Режим | Si | | Ge | |
|----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | $M(\text{Si})$ | $D(\text{Si})$ | $M(\text{Ge})$ | $D(\text{Ge})$ |
| I – <i>Норма</i> | 148 | 4,65 | 102,772 | 2,99 |
| II – <i>Недожог</i> | 148 | 15,33 | 82,022 | 3,08 |
| I – <i>Норма</i> | 145 | 4,61 | 101,202 | 3,22 |
| III – <i>Пережог</i> | 122 | 4,77 | 88,634 | 3,05 |

практически не изменяются дисперсии $D(\text{Si})$ и $D(\text{Ge})$, значительно уменьшается среднее значение $M(\text{Si})$, слегка уменьшается среднее значение $M(\text{Ge})$.

Таким образом, как сами режимы работы горелки (*Норма*, *Недожог*, *Пережог*), так и параметры сигналов датчика факела имеют нечеткий характер. Система же управления должна принимать решение, в какую сторону и насколько следует изменить подачу воздуха, чтобы привести режим работы горелки в состояние *Норма*, т. е. приблизить значение α к значению α_{opt} .

Для решения этой задачи воспользуемся методами нечеткого управления.

2. Нечеткие алгоритмы управления объектом. В настоящее время нечеткие алгоритмы управления (в различных модификациях) получили широкое распространение в мировой инженерной практике, особенно когда традиционные способы управления, существенно использующие математические модели объекта управления, не дают ожидаемого результата. Достоинством нечеткого алгоритма является сочетание его описания в виде близких к естественному языку инструкций (управляющих правил) с возможностью получения в результате его исполнения четкого числового значения управляющего воздействия.

Здесь под нечетким алгоритмом управления понимается совокупность n управляющих правил вида

$$P_i: \text{«Если } V_i, \text{ то } U_i\text{»}, \quad i = \overline{1, n},$$

описывающих процесс управления, где V_i – составное высказывание, задающее лингвистические значения входных переменных, а U_i – простое высказывание, задающее, как правило, в качестве управляющего воздействия один из термов выходной лингвистической переменной. Синтез правил может осуществляться на основе знаний физической сути управляемого процесса, либо путем интервью с экспертом, либо использованием мониторинга системы во время управления опытным оператором, либо путем создания самоорганизующейся системы, синтезирующей правила по заданным критериям качества и т. д.

Процедура вычисления управляющего воздействия z_0 выходной переменной z для заданных четких значений входных переменных осуществляется в три этапа.

Этап 1. Фазификация правил. Для каждого из правил P_1, P_2, \dots, P_n вычисляются значения $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$ достоверностей их левых частей V_1, V_2, \dots, V_n при заданных четких значениях входных переменных.

Этап 2. Нечеткая *max-min* композиция. К нечетким множествам U_1, U_2, \dots, U_n (среди них, естественно, могут быть и повторяющиеся) применяется операция нижнего σ_i -среза, т. е. формируются нечеткие множества B_1, B_2, \dots, B_n с функциями принадлежности $\mu_{B_i}(z) = \min(\sigma_i, \mu_{U_i}(z))$, $i = \overline{1, n}$. Над нечеткими множествами B_1, B_2, \dots, B_n производится операция объединения. Полученное нечеткое множество $B = \bigcup_{i=1}^n B_i$ является нечетким

управляющим значением выходной переменной.

Этап 3. Дефазификация нечеткого множества B . Процедура дефазификации заключается в вычислении четкого управляющего воздействия по его нечеткому значению. Существует ряд способов дефазификации нечетких

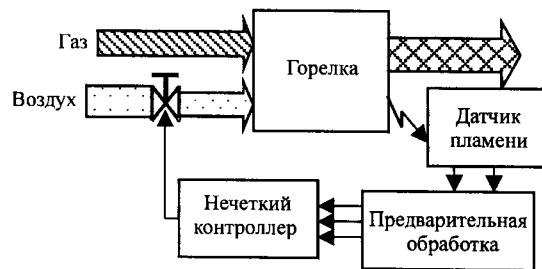


Рис. 3. Блок-схема системы управления горелкой

множеств. Наиболее распространенным является так называемый метод центра тяжести, суть которого заключается в следующем. Каждой точке отрезка действительной оси, на котором определено нечеткое множество B , приписывается вес, равный значению функции принадлежности нечеткого множества B в этой точке. Четким значением переменной объявляется координата z_0 центра тяжести построенной совокупности масс.

3. Предлагаемые схемы нечеткого управления. Применение описанной выше методики позволяет построить систему управления подачей воздуха в газовую горелку. Такая система будет поддерживать значение α , близкое к оптимальному, на основании нечеткой информации, полученной от оптико-электронного датчика факела. Блок-схема системы управления горелкой приведена на рис. 3.

Сигналы с двух выходов (Ge и Si) датчика факела подвергаются предварительной статистической обработке для получения текущих значений средних и дисперсий. Нечеткий контроллер использует три сигнала $M(Si)$, $D(Si)$ и $M(Ge)$ в качестве входных лингвистических переменных и вырабатывает единственное управляющее воздействие – изменение положения заслонки. При подаче на вход контроллера текущих значений вычисленных сигналов из блока предварительной обработки выполняется обычная процедура нечеткого вывода: производится фазификация входных переменных, в базе правил вычисляется нечеткое значение выходной переменной, которое затем дефазифицируется.

На рис. 4 приведена схема управления блоком горелок, отображающая иерархическое построение системы (два уровня: нижний – индивидуальные нечеткие контроллеры для каждой горелки, верхний – групповой нечеткий

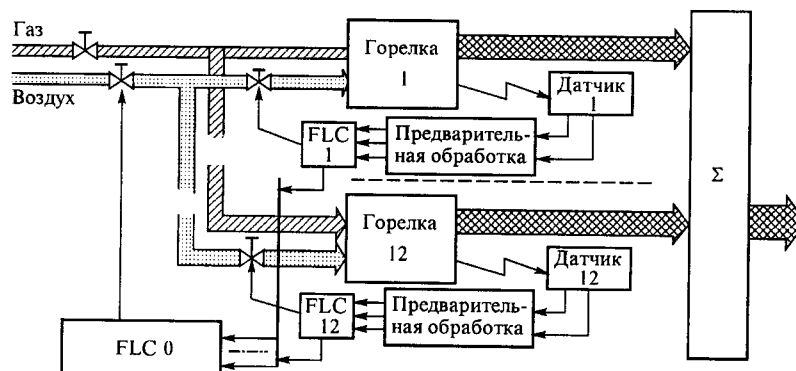


Рис. 4. Блок-схема группового управления горелками (FLC1, FLC2, ..., FLC12 – регуляторы горелок, FLC0 – регулятор групповой)

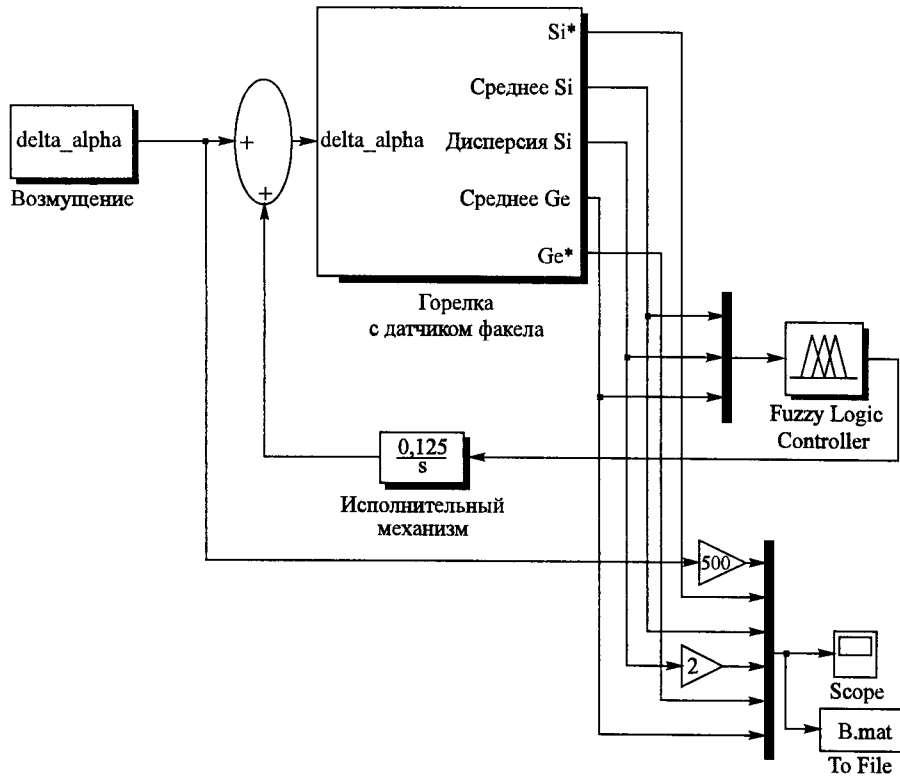


Рис. 5. Модель системы управления подачей воздуха в горелку

контроллер). В данной схеме функции контроллеров нижнего уровня аналогичны функциям контроллера отдельной горелки. Групповой контроллер призван решать задачи, непосильные контроллерам нижнего уровня. Например, если при полном открытии заслонки некоторой горелки нормальный режим горения не достигается, групповой контроллер, получив запрос от контроллера нижнего уровня, может попытаться увеличить общую подачу воздуха, воздействуя на групповую заслонку.

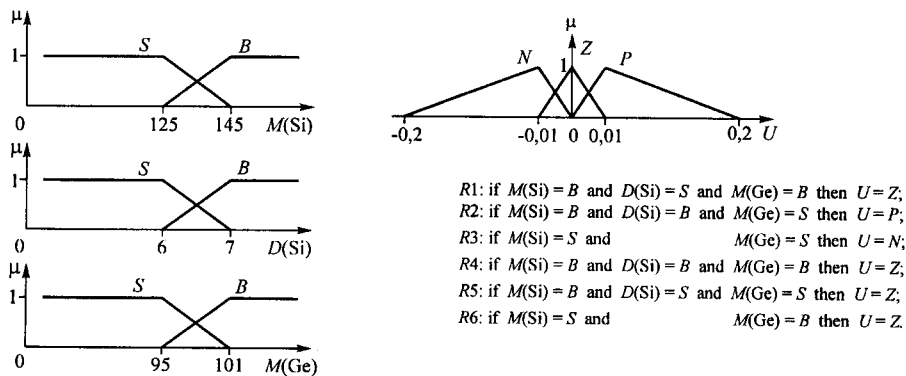


Рис. 6. База знаний нечеткого контроллера

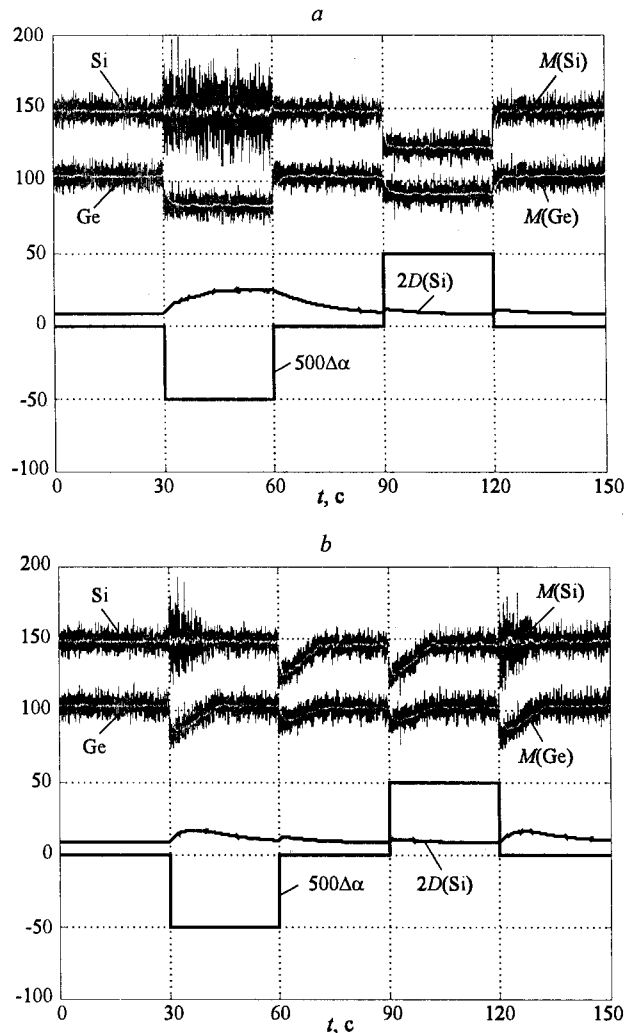


Рис. 7. Поведение сигналов датчика факела при скачкообразном изменении отношения α в системе без регулирования (а) и с включенной системой нечеткого регулирования (б)

4. Моделирование системы управления горелкой. Для проверки работоспособности нечеткого подхода при решении задачи управления подачей воздуха разработана модель системы в среде MATLAB-SIMULINK, включающая модель факела, нечеткий контроллер, модель исполнительного механизма и источник возмущения отношения воздух/топливо (рис. 5).

На рис. 6 приведен вид функций принадлежности термов входных и выходных лингвистических переменных и представлена база правил контроллера.

Поведение выходных сигналов фотоэлектронного датчика факела Si и Ge в различных модельных ситуациях изображено на рис. 7 и 8. На этих рисунках через $M(Si)$ и $D(Si)$ обозначены сигналы, соответствующие среднему значению и дисперсии сигналов кремниевого фотоприемника соответственно, через $M(Ge)$ – сигнал, соответствующий среднему значению выходного

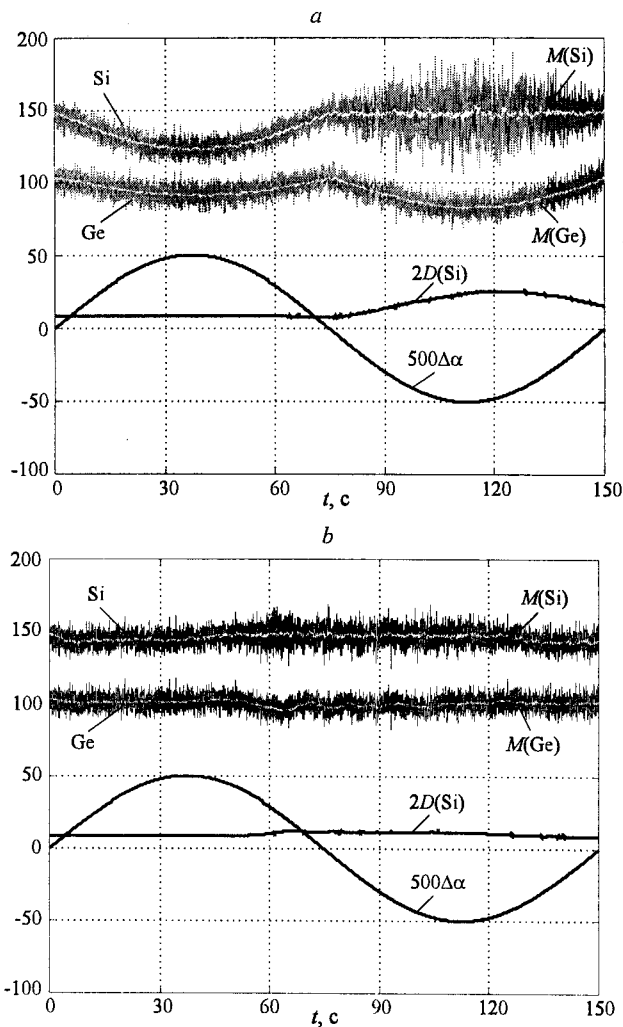


Рис. 8. Поведение сигналов датчика факела в системе без регулирования (а) и с включенной системой нечеткого управления (b) при синусоидальном изменении отношения α .

сигнала германиевого фотоприемника; обозначение $\Delta\alpha$ относится к изменению отношения воздух/топливо α .

Поведение сигналов датчика факела при скачкообразном изменении отношения α в моменты 30, 60, 90 и 120 с представлено на рис. 7, а, б.

На рис. 8, а, б отражено поведение сигналов датчика факела при синусоидальном изменении отношения α .

Из приведенных графиков видно, что предложенная система справляется с поставленной задачей и может поддерживать нормальный режим горения.

Заключение. В работе предложена нечеткая система оптимизации процесса сжигания газового топлива для многорелочного котлоагрегата с индивидуальным контролем факела каждой горелки и отдельным управлением подачей воздуха в каждую горелку. Представлены результаты моделирования ряда режимов работы системы, подтверждающие возможность эффек-

тивного управления технологическим процессом сжигания топлива для повышения технико-экономических и экологических показателей теплоэнергетических установок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ротач В. Я. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами. М.: Энергоатомиздат, 1985.
2. Пат. 2137047 РФ. Устройство дистанционного контроля пламени /В. Д. Анцыгин, С. М. Борзов, В. И. Козик и др. Опубл. 10.09.99, Бюл. № 25.
3. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применения к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976.
4. Нечеткие множества в задачах управления и искусственного интеллекта /Под ред. Д. А. Поспелова. М.: Наука, 1986.
5. Mamdani E. H. Applications of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant // Proc. IEE, 1974. 121, N 12. P. 1585.
6. Пивкин В. Я., Бакулин Е. П., Кореньков Д. И. Нечеткие множества в системах управления. Новосибирск, Изд-во НГУ, 1997.
7. Borzov S. M., Kozik V. I., Potaturkin O. I., Shushkov N. N. Optical-electronic information system for high-temperature processes remote monitoring // Proc. of the IASTED Intern. Conf. "Automation, Control, and Information Technology" (ACIT 2002). June 10–13, 2002, Novosibirsk, Russia. Calgary: ACTA Press., 2002. P. 147.

*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,
E-mail: zol@idisys.iae.nsk.su*

*Поступила в редакцию
9 сентября 2002 г.*