

В. С. Михайленко, Н. А. Князева, М. С. Солодовник

Одесская национальная академия пищевых технологий, учебно-научный институт холода, криотехнологий и экоэнергетики им. В. С. Мартиновского, ул. Дворянская, 1/3, Одеса, 65082

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ГОРЕНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В ПРЯМОТОЧНОМ ПАРОГЕНЕРАТОРЕ ЭНЕРГООБЛОКА ТЭС

Анализ КПД отечественных и зарубежных угольных тепловых электростанций, использующих современные инновационные технологии, демонстрирует преимущество последних в среднем на 3-7%. В связи с этим возникает научная задача повышения эффективности систем регулирования тепловыми процессами парогенераторов на основе использования интеллектуальной системы регулирования процесса горения твердого топлива. Интеллектуальная АСУ действует на основе теории нечеткой логики и способна корректировать расход топлива из-за возможности учета его физико-химических свойств. Разработана база знаний нечеткого регулятора и предложена структура интеллектуальной АСУ процесса горения. Внедрение интеллектуальной АСУ позволит улучшить процессы горения топлива и произвести его экономию при действии энергоблока в базовом и регулировочном режимах.

Ключевые слова: парогенератор – система управления – процесс горения – нечеткий регулятор.

В. С. Михайленко, Н. О. Князева, М. С. Солодовник

Одеська національна академія харчових технологій, навчально-науковий інститут холоду, криотехнологій та екоенергетики ім. В. С. Мартиновського, вул. Дворянська, 1/3, Одеса, 65082

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ ГОРІННЯ ТВЕРДИХ ПАЛИВ В ПРЯМОТОЧНИХ ПАРОГЕНЕРАТОРАХ ЕНЕРГООБЛОКУ ТЕС

Аналіз ККД вітчизняних і зарубіжних вугільних теплових електростанцій, що використовують сучасні інноваційні технології, демонструє перевагу останніх в середньому на 3-7%. У зв'язку з цим виникає наукова задача підвищення ефективності систем регулювання тепловими процесами парогенераторів на основі використання інтелектуальної системи регулювання процесу горіння твердого палива. Інтелектуальна АСУ діє на основі теорії нечіткої логіки і здатна коригувати витрати палива через можливість врахування його фізико-хімічних властивостей. Розроблено базу знань нечіткого регулятора і запропоновано структуру інтелектуальної АСУ процесу горіння. Впровадження інтелектуальної АСУ дозволить поліпшити процеси горіння палива і провести його економію при дії енергоблоку в базовому та регульовальному режимах.

Ключові слова: парогенератор – система управління – процес горіння – нечіткий регулятор.

I. ВВЕДЕНИЕ

Большинство тепловых объектов на электрических станциях – сложные динамические системы с распределенными параметрами. Аналитическое определение характеристик таких систем, например, в виде дифференциальных уравнений связано с большим объемом расчетных и экспериментальных исследований, как правило, не позволяющих получить адекватные математические модели тепловых объектов без корректировок автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) в процессе пуска, наладки и длительной эксплуатации при различных нагрузках.

Анализ научного материала [1–4] позволяет утверждать, что теплоэнергетические установки как

объекты управления характеризуются следующими особенностями.

Значительные по амплитуде и длительные отклонения регулируемых величин от заданных значений не только ухудшают экономические показатели оборудования, но и повышают вероятность его повреждения.

Показатели качества АСУ тесно связаны с надежностью работы всего теплового оборудования. В свою очередь, незначительные, но длительные и систематические отклонения регулируемых величин приводят к ухудшению экономических показателей энергоблока в целом. Например, отклонение содержания кислорода в уходящих газах от оптимального значения приводит к понижению КПД паровых котлов, ощутимому перерасходу топлива в масштабе крупной электростанции или энергосистемы в целом.

Еще одной особенностью является динамичность значений и порядка параметров объектов в силу влияния внешних и внутренних возмущений. Например, изменение нагрузки энергоблока, вызванное суточными колебаниями частоты электрической сети, неоднородным составом твердого топлива, переходом энергоблока с базового на регулировочные режимы, вызывает потребность в перенастройке значений коэффициентов его контуров управления. Можно отметить, что это важный признак того, что функционирование систем управления процессами ТЭС протекает в условиях априорной неопределенности. Рост требований к модернизации устаревших и созданию новых ТЭС ужесточает требования к адекватности математических моделей тепловых объектов и систем. Использование устаревших методов и алгоритмов идентификации и адаптации становится неэффективным [4]. Анализ КПД отечественных и зарубежных угольных тепловых электростанций, использующих современные инновационные технологии, демонстрирует преимущество последних в среднем на 3-7 % [3].

Зарубежный опыт разработки и эксплуатации автоматических систем управления сложными теплоэнергетическими объектами показывает, что непрерывным условием повышения их эффективности является не только усовершенствование технических средств и алгоритмов регулирования, но и внедрение интеллектуальных автоматических систем управления объектов ТЭС. Так, компания Praxis Engineers, Inc (США), на основе нейронных сетей, генетических алгоритмов и нечеткой логики разработала технологию OptiMation, позволяющую снизить затраты на эксплуатацию ТЭС путем системной оптимизации, повышения степени автоматизации и эффективной обработки информации [5]. В Великобритании разработана технология управления ТЭС с использованием гибридного контроллера на основе нейронных сетей. Внедрение нейросетевого контроллера на ко-

тельной установке Garth в Лондоне позволило уменьшить выбросы CO на 60% и NO_x на 10% [6]. Анализ результатов опытно-промышленных испытаний интеллектуальных систем управления на зарубежных ТЭС показал, что только за счет оптимизации процесса горения происходит повышение эффективности (КПД) котла на 3–5%, снижение выбросов NO_x на 20–30% и уменьшение расхода топлива до 8%. [7]. Однако, несмотря на широкое развитие теории интеллектуального управления, вопросы адаптации нечетких регуляторов, обучения нейросетевых регуляторов, оптимизации структур интеллектуальных АСУ и т.д. в теплоэнергетике сохраняют свою актуальность и требуют поиска новых методов и научных подходов для повышения эффективности энергосистемы страны.

II. АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЙСТВУЮЩЕЙ АСУ

Процессы эффективного сгорания твердого топлива являются наиболее важными при оценке экономической эффективности тепловой станции, поэтому в качестве объекта исследования рассмотрим систему регулирования качества горения топлива в прямоточном парогенераторе энергоблока мощностью 300 МВт (на примере парогенератора типовой Ладыжинской ТЭС, Украина). Автоматизированная система управления использует существующую закономерность между качеством горения топлива и содержанием кислорода в уходящих газах [8, 9]. Система управления экономичностью процесса горения твердого топлива действует так же, как и для барабанных парогенераторов, но с добавлением корректирующего сигнала по давлению пара. В АСУ используется каскадно-комбинированный принцип управления (рисунок 1).

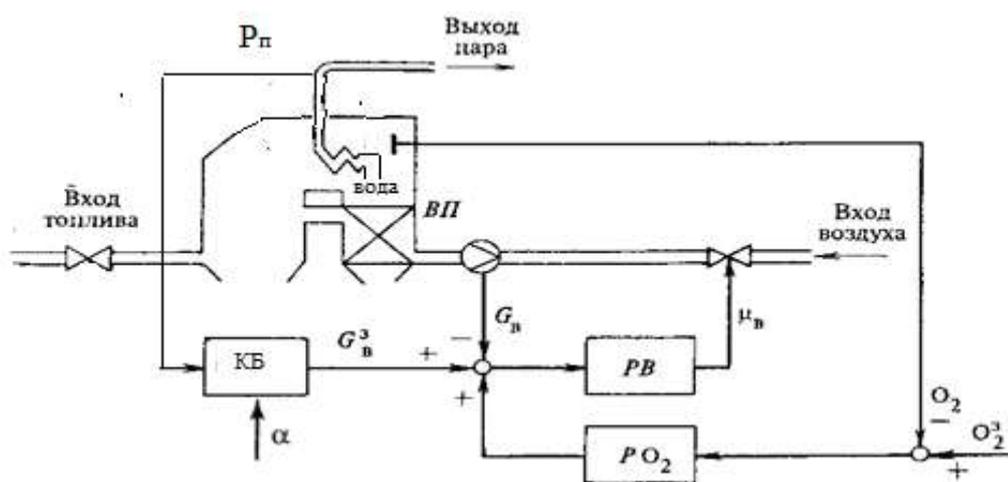


Рисунок 1 – Структурная схема АСУ процесса горения

На рисунке 1 регулятор подачи воздуха РВ изменяет его расход по сигналу давления пара от компенсатора (КБ – командного блока). Также РВ учитывает сигнал текущего расхода воздуха (жест-

кая обратная связь), который устраняет возмущения по каналу регулирования, а введение дополнительного корректирующего сигнала по содержанию O₂ в уходящих газах от регулятора кислорода PO₂ повы-

шает точность оптимального избытка воздуха в системе экономичности процесса горения. К недостаткам действующей схемы, по мнению авторов, можно отнести необходимость проведения процесса перенастройки (адаптации) регуляторов при работе энергоблока в длительном базовом и регулируемом режимах. Также традиционная АСУ не учитывает изменение физико-химических свойств угольной пыли, т.е. действует со значительным запаздыванием, сопровождающимся пережогом топлива и увеличением вредных выбросов в дымовых газах.

Известно, что экономичность работы парогенератора оценивается по его КПД [1]. Без учета теплоты, вносимой в топку воздухом, и потерь на продувку КПД котла составит:

$$\eta_k = \frac{D_{n.n}(i_0 - i_{n.e})}{B_T Q_H^p}, \quad (1)$$

где i_0 и $i_{n.e}$ – энтальпии перегретого пара и питательной воды, соответственно; Q_H^p – низшая рабочая теплота сгорания топлива, B_T – расход твердого топлива, $D_{n.n}$ – расход перегретого пара.

Выражая η_k через тепловые потери, сопровождающие процесс сжигания топлива, получаем:

$$\eta_k = 1 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6), \quad (2)$$

где q_1 – потери теплоты, вносимой в топку воздухом, q_2 – потери с уходящими газами, q_3 – потери от химического недожога, q_4 – потери от механического недожога, q_5 – потери теплоты из-за продувки, q_6 – потери от износа металла. Однако регулирование экономичности процесса непосредственно по КПД или суммарной оценке тепловых потерь не получило пока широкого распространения из-за отсутствия надежных способов и средств их непрерывного измерения.

Одним из наиболее распространенных косвенных способов оценки экономичности процесса горения является анализ состава топочных газов, покидающих топку. На основе зависимости КПД и суммарных потерь от избытка воздуха, определяемой индивидуально для каждого агрегата, целесообразно поддерживать оптимальное значение коэффициента избытка воздуха α , при котором КПД котла $\eta_k \rightarrow \eta_{max}$ и суммарные потери стремятся к минимуму (рисунок 2). Значение коэффициента избытка воздуха α можно оценить по содержанию свободного кислорода в газах, покидающих топочную камеру, по формуле:

$$\alpha = \frac{21}{21 - |O_2|}, \quad (3)$$

где O_2 – процентное содержание кислорода в уходящих газах. Значение α в основном влияет на q_2 (потери теплоты с уходящими газами) и q_3, q_4 . Зависимости $\eta_k = f(\alpha)$ представлены на рисунке 2.

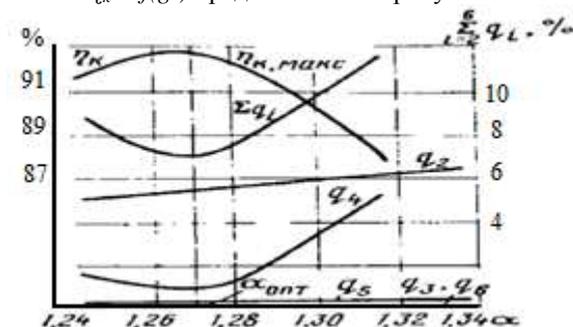


Рисунок 2 – Графики для пылеугольного прямоточного котла энергоблока ТЭС

Участок регулирования экономичности процесса горения по содержанию кислорода в топочных газах состоит из топочной камеры и примыкающего к ней газохода конвективного перегревателя до места измерения содержания O_2 , %. Входное регулирующее воздействие участка – расход воздуха, поступающего в топку Q_6 , а выходная (регулируемая) величина – содержание свободного кислорода в поворотной камере газохода за пароперегревателем O_2 , %. Оптимальное значение O_2 в поворотной камере при номинальной нагрузке и сжигании пылевидного топлива лежит в пределах 3–5%, т.е. α составляет 1,26–1,28 (рисунок 2).

Анализ графиков содержания кислорода в уходящих газах типовой Ладыжинской ТЭС (рисунок 3) указывает на колебание процентного состава кислорода от 1,5 до 6,2%. Таким образом, коэффициент избытка воздуха с регулярной периодичностью изменяется от 1,07 до 1,42, что сопровождается значительным перерасходом топлива и, как следствие, снижением КПД. Излишнее количество воздуха приводит к увеличению потерь тепла с уходящими газами и снижению их температуры, а недостаток воздуха может вызвать появление потерь от химической неполноты сгорания, что также приводит к снижению температуры топочных газов и, как следствие, к снижению экономических показателей.

На рисунке 3:

- 1 – содержание кислорода в отходящих газах блока А;
- 2 – содержание кислорода в отходящих газах блока Б.

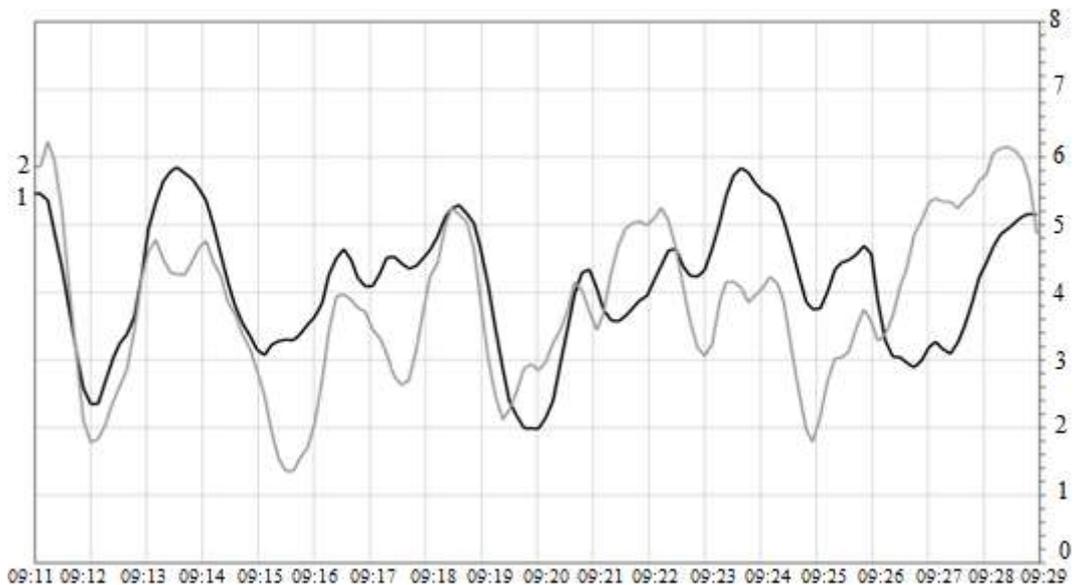


Рисунок 3 – Переходные процессы АСУ содержания O_2 в уходящих газах в двух энергоблоках (А и Б) Ладыжинской ТЭС

III. РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ АСУ

Для повышения эффективности процесса горения в прямоточных парогенераторах авторами предлагается интеллектуальная система управления с дополнительным информационным каналом по измерению зольности и влажности угольного топлива

(рисунок 3). Интеллектуальная АСУ функционирует на основе теории нечеткой логики [10, 11]. Следует отметить, что математический аппарат теории нечеткой логики успешно применяется в системах управления, действующих в условиях неопределенности, и основан на моделировании знаний, опыта и интуиции лиц, принимающих решения [12–16].

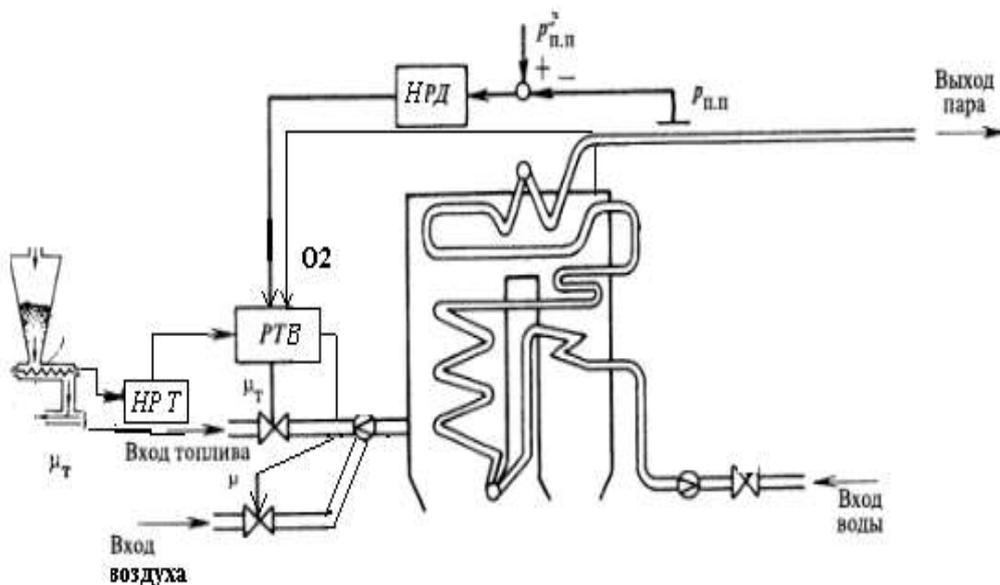


Рисунок 4 – Схема интеллектуальной АСУ процесса горения

На рисунке 4: НРТ – нечеткий регулятор топлива, РТВ – регулятор топливо – воздух (нечеткий), НРД – нечеткий регулятор давления (компенсатор).

Система управления учитывает связь между нагрузкой энергоблока и экологическими показателями, в результате – производит минимизацию содержания вредных выбросов в дымовых газах. В

качестве анализаторов топлива предложены приборы фирмы Enelex – система он-лайн измерения калорийности GE 3000 CM [16]. Система позволяет определять калорийность угля прямо на ленте конвейера благодаря комбинации измерения зольности радиометрическим способом и микроволновым измерением влажности угля. Для усовершенствования

системы анализа качества угля предлагается дооснастить ее процессом нечеткого управления (НРТ). Нечеткий регулятор топлива является корректирующим регулятором для РТВ. Принцип действия НРТ заключается в выработке управляющего воздействия на расход топлива исходя из рекомендаций экспертов-технологов о влиянии химических свойств угольной пыли на процесс горения. Например, для исследуемого объекта Ладыжинской ТЭС основным видом топлива является уголь марки ГСШ 0-13, антрацит АС 6-13, добываемый в Донецком регионе (г. Павлоград), а также бурый уголь Александрийского месторождения. Для анализа взят уголь марки ГСШ, используемый на Ладыжинской ТЭС в качестве топлива. Известно, что исходя из месторасположения карьера и глубины шахты, а также условий транспортировки и хранения на складах основные физико-химические свойства топлива, влияющие на эффективность процесса горения, варьируются в широком диапазоне. Для учета данных особенностей и разработки СППР процесса горения проведены этапы фазсификации ключевых параметров угля (зольности и влажности), а также значений расхода угольного топлива для прямооточного котла ТПП 312. В зависимости от текущих значений зольности и влажности угля НРТ вырабатывает корректирующий сигнал об изменении расхода топлива, поступающего в топку котла. База знаний НРТ строится по принципу правил продукций вида:

1. Если зольность высокая И влажность высокая, ТО расход выше заданного;
2. Если зольность средняя И влажность средняя, ТО расход топлива соответствует заданному ;
3. Если зольность низкая И влажность низкая, ТО расход топлива ниже заданного и т.д.

Соответствующая коррекция расхода учитывается аналогичной базой знаний нечеткого РТВ для изменения расхода воздуха с целью обеспечения достижения оптимального коэффициента избытка воздуха. Функции принадлежности входных и выходной лингвистических переменных (зольность, влажность, расход топлива), а также результат определения корректирующего расхода по алгоритму

Мамдани в пакете MatLab (Fuzzy Logic Toolbox) представлены на рисунках 5 – 8.

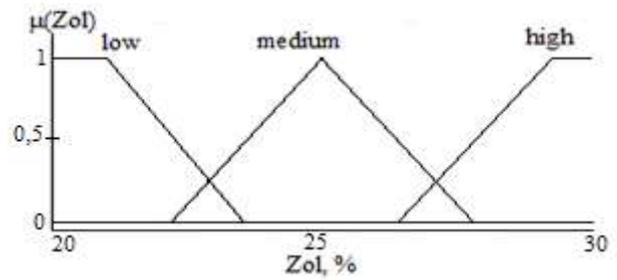


Рисунок 5 – Функции принадлежности «зольность угля»

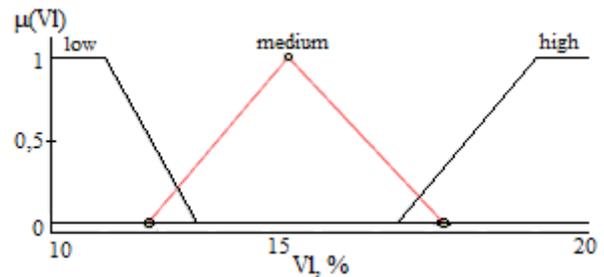


Рисунок 6 – Функции принадлежности «влажность угля»

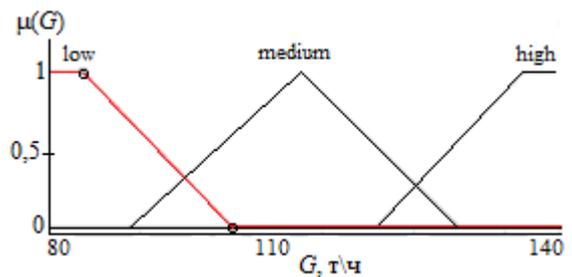


Рисунок 7 – Функции принадлежности «расход угля»

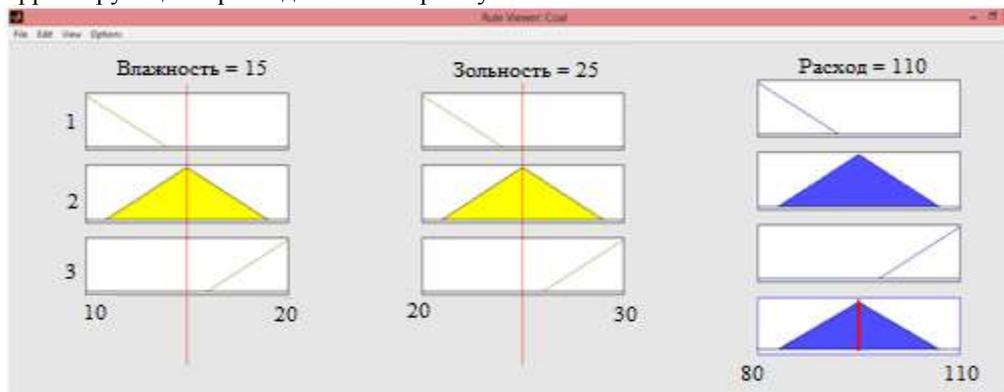


Рисунок 8 – Окно результата расчета текущего расхода топлива в программе (Fuzzy Logic Toolbox)

Второй корректирующий сигнал на РТВ оказывает нечеткий регулятор давления пара (НРД), влияющий на мощность энергоблока. На вход НРД поступают два сигнала (ошибка и скорость изменения ошибки), а выходом является корректирующее воздействие по изменению расхода топлива в зависимости от заданной нагрузки на энергоблок. База знаний НРД строится с учетом принципа действия нечеткого компенсатора [13,14]. Третьим корректирующим сигналом для РТВ, влияющим на расход воздуха, является информация о содержании O_2 в уходящих газах. Для анализа свойств продуктов сгорания (дымовых газов) предлагается использовать анализаторы фирмы Enelex марки АЕ 5 или FGA 900.

Имитационное моделирование регуляторов производится по технологиям, предлагаемым в публикациях [13, 14].

В компьютерной модели (рисунок 9), разработанной в программе MatLab (Simulink), верхний канал – управление расходом воздуха, нижний канал – корректировка по содержанию O_2 . На компьютерной модели элемент Fuzzy Controller, является элементом АСУ, предназначенным для моделирования процесса управления, исходя из значений задания (Step) и ошибки регулирования. Модель нечеткого регулятора соотношения топливо-воздух действует по алгоритму Сугено [10].

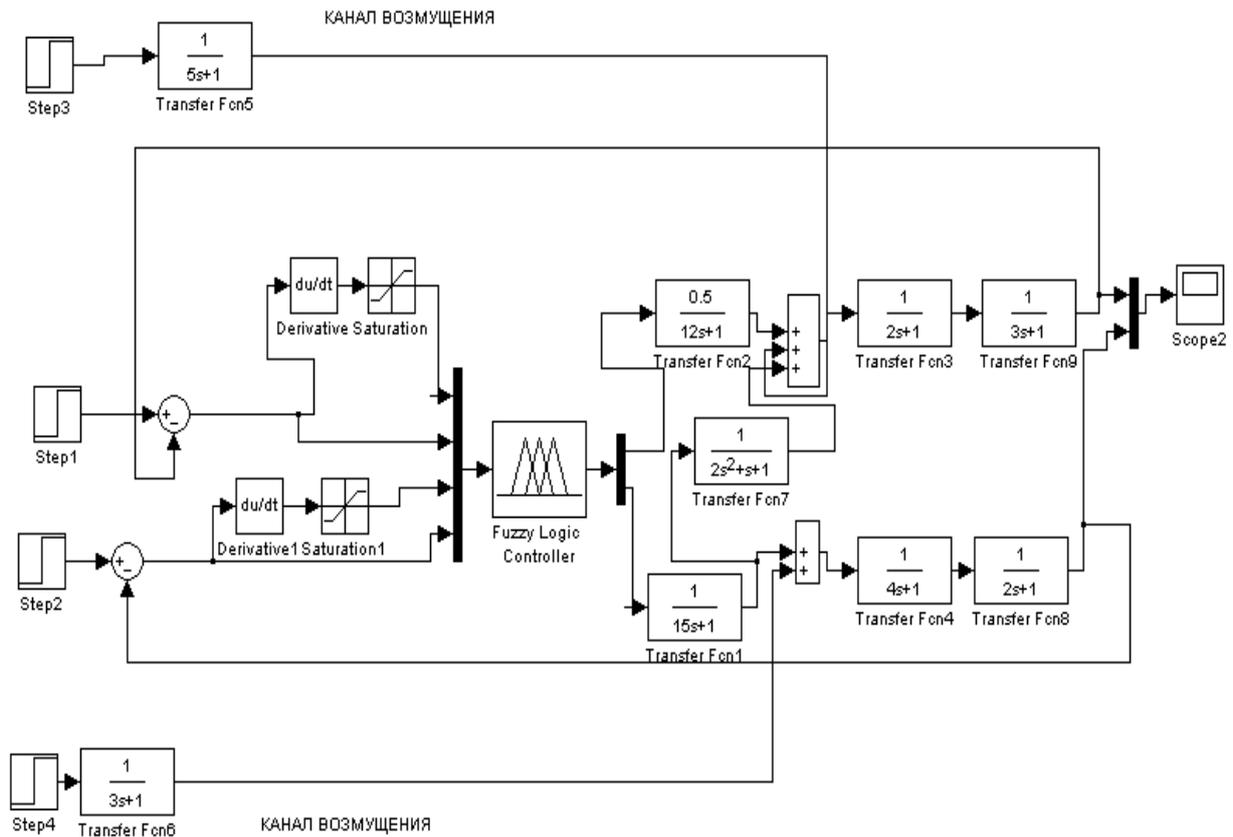


Рисунок 9 – Имитационная модель

Результаты имитационного эксперимента, демонстрирующего преимущества предложенного подхода, показаны на рисунке 10. Переходный процесс интеллектуальной АСУ носит затухающий характер без неблагоприятных колебаний, с наименьшим временем регулирования в сравнении с типовой АСУ.

На рисунке 10:

- 1 – содержание кислорода в отходящих газах блока А;
- 2 – содержание кислорода в отходящих газах блока Б;
- 3 – интеллектуальная АСУ.

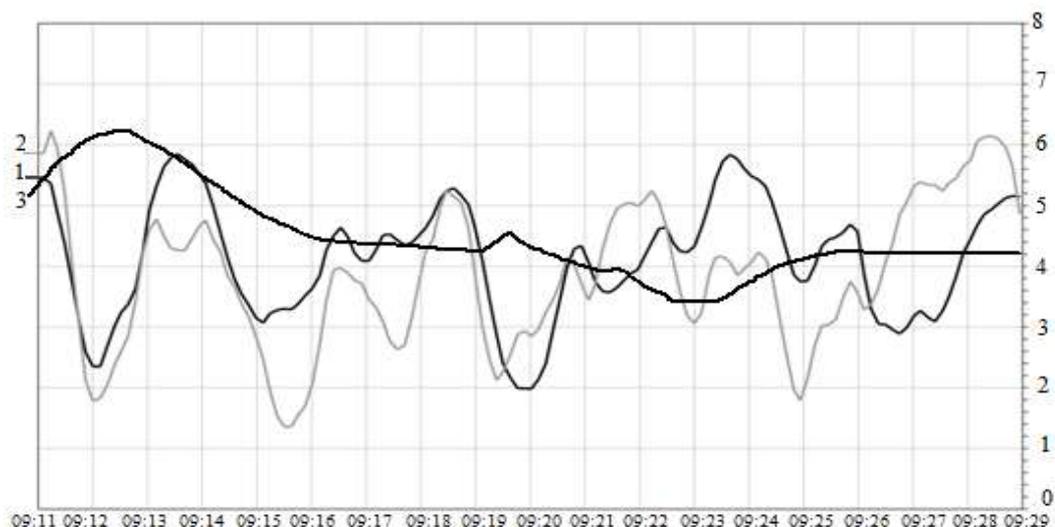


Рисунок 10 – Переходные процессы

Как следует из сравнительного анализа показателей качества переходных процессов (рисунок 10), время регулирования T_r предложенной интеллектуальной АСУ составляет не более 5 минут. Кроме того, преимущество интеллектуальной АСУ состоит в том, что её переходный процесс является аperiодическим в сравнении с автоколебательным процессом типовой АСУ, находящимся на границе устойчивости.

ВЫВОДЫ

С учетом показателей качества переходных процессов, можно утверждать, что использование интеллектуальной АСУ позволяет улучшить процессы горения топлива и произвести его экономии при действии энергоблока в базовом и регулировочном режимах, стабилизировать значения O_2 и NO_x в продуктах сгорания и снизить количество неверных решений обслуживающего персонала при работе в режиме дистанционного управления. Также взаимосвязь концентрации вредных выбросов от режимных факторов энергоблока может быть учтена в процессе проектирования и наладки НРВ в дальнейших исследованиях, что позволит оптимизировать экологическую составляющую процесса горения. Предложенная технология может быть использована также на котлах ТЭЦ и районных котельных, действующих на твердом топливе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Плетнев Г. П. Автоматизированное управление объектами тепловых электростанций / Г. П. Плетнев. - М.: Энергоиздат, 1986. - 368 с.
2. Дейч А. М. Методы идентификации динамических объектов / А. М. Дейч. - М.: Энергия, 1979. - 240 с
3. Михайленко В.С. Инновационный подход в модернизации систем управления технологических процессов энергоблоков ТЭС // Промышлен-

ная энергетика № 7 2014. – С.

4. Ш.Е. Штейнберг, Л.П. Серезин, И.Е. За-луцкий, И.Г. Варламов. Проблемы создания и эксплуатации эффективных систем регулирования. // Промышленные АСУ и контроллеры, № 7. 2004 с 1-7.
5. Yang, P. Neural networks internal model control for water level of boiler drum in power station / P. Yang, D. G. Peng, Y. H. Yang, Z. P. Wang // Proceedings of 2010 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, vol. 5, 26-29 Aug. 2010. – P. 3300-3303.
6. Sehgal R., Marolda P. J. Intelligent Optimization of Coal Burning to Meet Demanding Power Loads, Emission Requirements, and Cost Objectives. GE Power Systems GER-4198. – 2000.
7. Jankowska A. Neural models of air pollutants emission in power units combustion processes // Symp. On Methods of Artificial Intelligence, Gliwice, Poland, Nov. 5–7 2003. – P. 141–144.
8. Ротач В. Я. Теория автоматического управления / В. Я. Ротач. - М.: МЭИ, 2008 - 396 с.
9. Ключев А. С. Наладка систем автоматического регулирования котлоагрегатов / А. С. Ключев, А. Г. Товарнов. - М.: Энергия, 1970 - 280 с.
10. Леоненков А. Ю. Нечеткое моделирование в среде Matlab и fuzzyTech / А. Ю. Леоненков. - С. - Птб.: БХВ, 2003. - 720 с.
11. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы ; пер. с польск. И. Д. Рудинского. - М.: Горячая линия - Телеком, 2006.- 452 с.
12. Astrom, K. J. Advanced PID control / K. J. Astrom, T. Hagglund T. – ISA - The Instrumentation, Systems, and Automation Society. – 2006. – 460 p.
13. Михайленко В.С., Ложечников В.Ф. Анализ методов разработки нечетких САР для управления сложными взаимосвязанными объектами. // Автоматика. Автоматизация. Электрические комплексы и системы №1 (23) 2009. - С. 171 – 177.

14. **Алиев Р.А.** Управление производством при нечеткой исходной информации / Р. А. Алиев, А. Э. Церковный, Г. А. Мамедова. – М.: Энергоиздат, 1991. – 234 с.
15. **Аракелян Э.К.** Концепция мягкого регулирования технического обслуживания энергоустановок ТЭС на основе интеллектуальной диагностики /

Э. К. Аракелян, Г. Д. Крохин, В. С. Мухин // Вестник МЭИ. – 2008. – № 1. – М: Изд-во МЭИ. –С.14-20.

16. **Ибрагимов И.М.** Использование систем искусственного интеллекта при эксплуатации энергетических объектов. // Надежность и безопасность энергетики № 1, 2008 – с.51-56.

V. Mikhailenko, N. Kniazieva, M. Solodovnik

Odessa national academy of food technologies, 1/3 Dvorjanskaja st., Odessa, 65026

INTELLIGENT CONTROL SYSTEM OF THE COMBUSTION PROCESS SOLID FUEL IN THE FLOW STEAM GENERATOR OF THERMAL POWER-STATION

Analysis of the efficiency of domestic and foreign coal-fired thermal power plants, which use modern innovative technology, demonstrates the advantage of the latter by an average of 3-7%. In this connection there is a scientific challenge of improving the effectiveness of the system of re-regulation of thermal processes of steam generators exemplified by the synthesis of intelligent systems of control the combustion process of solid fuels. Intelligent automatic control systems operates on the basis of the theory of fuzzy logic and the ability to adjust the fuel consumption the possibility of taking into account its physical and chemical properties. Developed knowledge base of fuzzy controller and proposed structure of the intellectual automatic control systems of combustion process. ACS will allow the improve of fuel combustion processes and make savings in the base mode and adjusting mode.

Keywords: steam generator – control system – the combustion process – a fuzzy controller.

REFERENCES

- Pletnev G. P.** Avtomatizirovanoe upravlenie ob'ektami teplovyyh elektrostantsiy / G. P. Pletnev. - M.: Energoizdat, 1986. - 368 s. (in Russian)
- Deych A. M.** Metody identifikatsii dinamicheskikh ob'ektov / A. M. Deych. - M: Energiya, 1979. - 240 s (in Russian)
- Mihaylenko V.S.** Innovatsionnyy podhod v modernizatsii sistem upravleniya tehnologicheskikh protsessov energoblokov TES // Pro-myishlennaya energetika № 7 2014. – S. (in Russian)
- Sh.E. Shteynberg, L.P. Serezhin, I.E. Za-lutskiy, I.G. Varlamov.** Problemy sozdaniya i ekspluatatsii effektivnykh sistem regulirovaniya. // Promyshlennyye ASU i kontrolyeri, # 7. 2004 s 1-7. (in Russian)
- Yang, P.** Neural networks internal model control for water level of boiler drum in power station / P. Yang, D. G. Peng, Y. H. Yang, Z. P. Wang // Proceedings of 2010 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, vol. 5, 26-29 Aug. 2010. – P. 3300-3303. (in English)
- Sehgal R., Marolda P. J.** Intelligent Optimization of Coal Burning to Meet Demanding Power Loads, Emission Requirements, and Cost Objectives. GE Power Systems GER-4198. – 2000. (in English)
- Jankowska A.** Neural models of air pollutants emission in power units combustion processes // Symp. On Methods of Artificial Intelligence, Gliwice, Poland, Nov. 5–7 2003. – P. 141–144. (in English)
- Rotach V. Ya.** Teoriya avtomaticheskogo upravleniya / V. Ya. Rotach. - M.: MEI, 2008 - 396 s. (in Russian)
- Klyuev A. S.** Naladka sistem avtomaticheskogo regulirovaniya kotloagregatov / A. S. Klyuev, A. G. Tovarnov. - M.: Energiya, 1970 - 280 s. (in Russian)
- Leonenkov A. Yu.** Nechetkoe modelirovaniye v srede Matlab i fuzzyTech / A. Yu. Leonenkov. - S. - Ptb.: BHV, 2003. - 720 s (in Russian)
- Rutkovskaya D., Pilinskiy M., Rutkovskiy L.** Neyronnyie seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy ; per. s polsk. I. D. Rudin-skogo. - M.: Goryachaya liniya - Telekom, 2006. - 452 s. (in Russian)
- Astrom, K. J.** Advanced PID control / K. J. Astrom, T. Hagglund T. – ISA - The Instrumentation, Systems, and Automation Society. – 2006. – 460 p. (in English)
- Mihaylenko V.S., Lozhechnikov V.F.** Analiz metodov razrabotki nechetkikh SAR dlya upravleniya slozhnyimi vzaimosvyazannymi ob'ektami. // Avtomatika. Avtomatizatsiya. Elektricheskie kompleksy i sistemy #1 (23) 2009. - S. 171 – 177. (in Russian)
- Aliev R.A.** Upravlenie proizvodstvom pri nechetkoy ishodnoy informatsii / R. A. Aliev, A. E. Tserkovnyiy, G. A. Mamedova. – M.: Energoizdat, 1991. – 234 s. (in Russian)
- Arakelyan E.K.** Kontseptsiya myagkogo regulirovaniya tehnicheskogo obsluzhivaniya energostanovok TES na osnove intellektualnoy diagnostiki / E. K. Arakelyan, G. D. Krohin, V. S. Mulin // Vestnik MEI. – 2008. – # 1. – M: Izd-vo MEI. –S.14-20. (in Russian)
- Ibragimov I.M.** Ispolzovanie sistem iskusstvennogo intellekta pri ekspluatatsii energeticheskikh

ob'ektov. // Nadezhnost i bezo-pasnost energetiki # 1,
2008 – s.51-56 (in Russian).