

УДК 681. 515.4

**Михайленко В.С.<sup>1</sup>, Харченко Р.Ю.<sup>2</sup>**<sup>1</sup> Одесская государственная академия холода<sup>2</sup> Одесская национальная морская академия

## СИНТЕЗ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА В ЭНЕРГОБЛОКАХ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Проведено аналіз діючої системи автоматичного управління якості горіння палива в паровому котлі барабанного енергоблоку ТЕС та запропоновано більш ефективну інтелектуальну САУ. Комп'ютерні дослідження запропонованої структури нейроемулятора із використанням спеціалізованого математичного пакету MatLab показали, що інтелектуальна САУ демонструвала допустимий час регулювання і стійкість на відміну від традиційної, яка потребує проведення етапів адаптації.

Проведен анализ действующей системы автоматического управления качества горения топлива в паровом барабанном котле энергоблока ТЭС и предложена более эффективная интеллектуальная САУ. Компьютерные исследования предлагаемой структуры нейроэмулятора с использованием специализированного математического пакета MatLab показали, что интеллектуальная САУ демонстрировала допустимое время регулирования и устойчивость в отличие от традиционной, нуждающейся в адаптации.

The analysis of the current automatic control system of the quality of fuel combustion in the steam drum boiler unit of thermal electric power plant has been made and a more effective intellectual ACS has been proposed. Computer studies of the suggested neuroemulator structure using specialized mathematical MatLab package showed that the ACS has demonstrated intellectual allowable time control and stability, in contrast to the traditional one required for adaptation.

**Индексы:**

ЗУ – задающее устройство;

КБ – командный блок;

НСК – нейросетевой контроллер;

ПИ – пропорционально интегральный;

ПИД – пропорционально интегрально дифференциальный;

РВ – регулятор расхода воздуха;

РО<sub>2</sub> – регулятор содержания кислорода;

САУ – система автоматического управления;

ТЭС – тепловая электростанция;

T<sub>p</sub> – время регулирования.

В настоящее время продолжавшаяся вторую половину XX века тенденция уменьшения роли барабанных котлов в отечественной электроэнергетике, наметившаяся в связи с появлением прямоточных котлов и ряда других факторов, сменилась на противоположную. Это объясняется несколькими причинами, в том числе внедрением парогазовых технологий, основой которых являются котлы-утилизаторы, как правило, барабанного типа. При этом, абсолютное большинство барабанных котлов – это барабанные котлы высокого давления. Таких котлов в украинском топливо – энергетическом комплексе (ТЭК) количественно установлено больше, чем паровых котлов всех других конструкций вместе взятых. Вместе с тем,

уровень износа оборудования отечественных ТЭС достигает более 80 %, и в этой связи актуальной является проблема модернизации ТЭК [1]. Также следует отметить, что в современных условиях значительно разуплотнились графики нагрузки энергосистем, что приводит к возникновению новых требований к оборудованию станций, которое должно работать с большей маневренностью, чем это предусматривалось при его проектировании.

Как известно, конструкционные особенности барабанных паровых котлов энергоблоков ТЭС позволяют расчленивать многомерную систему регулирования их режимов на несколько относительно независимых систем, среди которых важное значение принадлежит систе-

ме оптимизации качества процесса горения топлива [2]. Показателем качества функционирования этой системы является удельный расход топлива, который должен быть минимально возможным. Однако непосредственное оперативное управление этим показателем не представляется возможным, так как его вычисление связано с достаточно длительным интегрированием расхода топлива и нагрузки энергоблока, величина которой носит переменный характер. Поэтому, предпринимались многочисленные поиски косвенной регулируемой величины, поддержание которой на том или ином уровне гарантировало бы достаточно приемлемую близость удельного расхода к минимуму [2-4]. На современных украинских ТЭС действует традиционная каскадная система управления процессом горения с использованием газоанализатора. Однако данные системы отличаются рядом существенных недостатков и нуждаются в усовершенствовании [4].

Вместе с тем, в последнее время широкое распространение на зарубежных ТЭС получают интеллектуальные системы автоматического управления [5]. Так Фирма 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. Компанией AI WARE Inc, (США) предложена технология управления газообразными выбросами, являющейся комбинацией нейронной сети и системы многоцелевой нелинейной оптимизации с анализом процесса горения [6]. Технология позволяет увеличить тепловую мощность на 0,5 % и снизить на 6 % выбросы  $\text{NO}_x$ . Также компанией разработана математическая модель искусственной нейронной сети с запаздыванием (TDNN) для прогнозирования выбросов  $\text{NO}_x$  и  $\text{CO}$  на ТЭС. Результаты экспериментов показали хорошее совпадение реальных и прогнозных значений по выбросам  $\text{NO}_x$  и  $\text{CO}$  и доказали возможность эффективного прогнозирования таких выбросов. Компания Neural

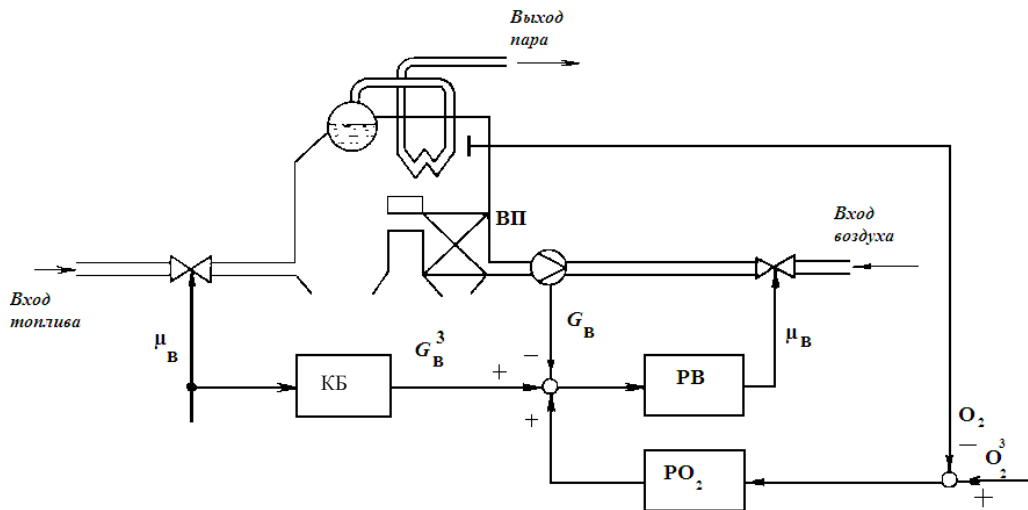
Ware синтезировала прикладную систему своего системного интегратора NeuCOP II, прогнозирующую выделение  $\text{NO}_x$  и оптимизирующую работу пылеугольных котлов на электростанции в Остроленке (Польша) [7]. В Великобритании была разработана новая технология управления угольной ТЭС с использованием гибридного контроллера на основе нейронных сетей [8]. Гибридный контроллер выполняет работу квалифицированного оператора котельной установки путем использования опыта и знаний оператора-человека в виде модулей нейронной сети и блока нечеткой логики. Эти модули были интегрированы в систему знаний, в которой была установлена структура правил, позволяющих гибриднему контроллеру имитировать действия эксперта-оператора. Внедрение гибридного контроллера на котельной установке Garth в Лондоне позволило уменьшить выбросы  $\text{CO}$  на 60 % и  $\text{NO}_x$  на 10 %. На основе дальнейшего развития гибридных нейронных контроллеров была внедрена новая технология управления угольной ТЭС с использованием нейронных сетей (Neuromon). Синтез интеллектуальных технологий позволил разработать нейронный контроллер, который может автоматически работать в условиях разнообразных сортов углей и вызванной этим изменением мощности установки. С использованием интеллектуальной системы управления можно достигнуть оптимального режима горения (соотношение воздух-топливо) из любого исходного стартового состояния энергоблока. Анализ результатов опытно-промышленных испытаний на зарубежных ТЭС интеллектуальных систем первого поколения с простой архитектурой нейронных сетей показал, что только за счет оптимизации процесса горения происходит повышение эффективности (КПД) котла на 1...2 %, снижение выбросов оксидов азота на 20...30 % и уменьшение потребления топлива до 5 % [5-8]. Исходя из перспективности указанных технологий, становится актуальным проведение исследований в области синтеза интеллектуальных САУ на украинских ТЭС, ТЭЦ, АЭС и т.д.

Целью статьи является критический анализ действующей САУ процессом горения и предложение более эффективной интеллектуальной системы управления.

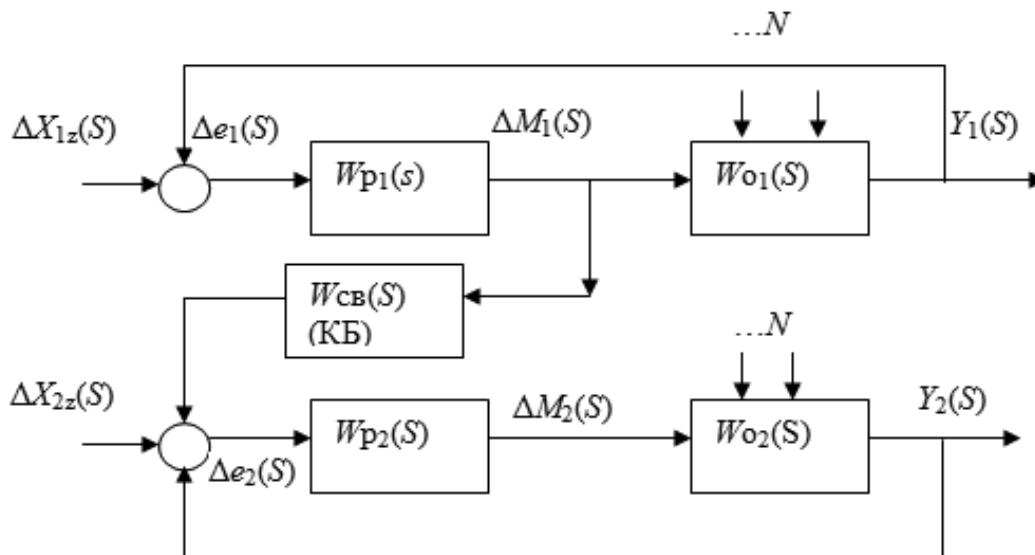
**Анализ действующей САУ**

В качестве объекта исследования рассмотрим систему регулирования качества горения топлива в паровом барабанном котле энергоблока ТЭС [2]. САУ использует существующую закономерность между качеством горения топлива и содержанием кислорода в

уходящих газах. Проведем исследование на эффективность каскадной структуры (рис. 1), главным регулятором в которой является регулятор содержания кислорода  $PO_2$ , он воздействует на вспомогательный регулятор расхода воздуха  $PВ$ , действующий в составе системы «топливо — воздух». Заданный расход воздуха зависит от расхода топлива. Сигнал от расхода топлива подается на вход регулятора воздуха  $PВ$  через командный блок  $КБ$ . Необходимость использования каскадной



**Рис. 1.** САУ горения «топливо – воздух» с дополнительным сигналом по  $O_2$  в уходящих газах:  $ВП$  – воздухоподогреватель,  $КБ$  – командный блок,  $PВ$  – регулятор расхода воздуха,  $PO_2$  – регулятор содержания кислорода.



**Рис. 2.** Схема двухконтурной системы управления.

схемы обусловлена относительно большим запаздыванием, которым обладают существующие приборы-анализаторы содержания кислорода в уходящих газах.

Рассматриваемую структуру можно представить в виде двухконтурной системы управления (рис. 2).

На устройство связи (рис. 2) с передаточной функцией  $W_{cb}(S)$  поступает информация об управляющем воздействии  $\Delta M_1(S)$  с выхода регулятора  $PO_2$  с передаточной функцией  $W_{p1}(s)$ . Устройство связи представляет собой средство (командный блок КБ), производящее корректировку задания второму ПИД – регулятору  $W_{p2}(S)$  при изменении задания  $\Delta X_{1z}(S)$  первому ПИД – регулятору с передаточной функцией  $W_{p1}(S)$ . Регуляторы воздействуют на объекты с передаточными функциями  $W_{o1}(s)$ ,  $W_{o2}(s)$  по каналам задания.

На регулятор  $W_{p2}(S)$  или (РВ) также поступает информация о текущем расходе топлива по каналу обратной связи. В случае возникновения ошибки  $\Delta e_2(S)$ , регулятор вырабатывает управляющее воздействие  $\Delta M_2(S)$  на объект управления  $W_{o2}(S)$ . Процесс управления проходит под наблюдением опытного оператора – эксперта. Объекты подвержены влиянию внешних возмущений ( $N$ ).

Оператор, получая лабораторную информацию о химическом составе уходящих газов, для корректировок соотношения «топливо – воздух», меняет задание на задающем устройстве регулятору 1, который вырабатывает новое управляющее воздействие. Информация о новом управлении через корректирующее устройство (устройство связи  $W_{cb}(s)$ ) подается на регулятор 2. Первый регулятор, в зависимости от новой информации, вырабатывает управляющее воздействие в виде изменения угла поворота регулирующего органа. Соотношение расходов топливо – воздух определяется содержанием кислорода  $O_2$  в уходящих газах на основании которого определяется коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  [2,3] и, как правило, в качестве корректирующего устройства выступает пропорциональное звено. Участок регулирования экономичности процесса го-

рения по содержанию кислорода в топочных газах состоит из топочной камеры и примыкающего к ней конвективного перегревателя до места измерения содержания  $O_2$  %. Входное регулирующее воздействие – расход воздуха, поступающий в топку, а выходная величина – содержание свободного кислорода в поворотной камере газохода за пароперегревателем.

Оптимальное значение  $O_2$  в поворотной камере при номинальной нагрузке и сжигании пылевидного топлива лежит в пределах 3...5 %, при сжигании мазута и газа 0,2...2 % [2]. Значительная инерционность участка регулирования объясняется влиянием объема топочной камеры и примыкающего к ней газохода, а также запаздыванием в измерительном устройстве (газоанализаторе). При математическом описании динамических свойств этот участок рекомендуется представить в виде последовательного соединения двух инерционных звеньев с постоянными времени  $T$  и звена транспортного запаздывания  $\tau$  [2]. Рассмотрим наиболее распространенную систему регулирования экономичности по соотношению топливо – воздух [4]. При постоянном качестве топлива его расход и количество воздуха, необходимое для обеспечения требуемой полноты сгорания, связаны прямой пропорциональной зависимостью (пропорциональным звеном), устанавливаемой в результате режимных испытаний. При газообразном топливе требуемое соотношение между расходом газа и воздуха осуществляется путем сравнения перепадов на сужающих устройствах газопровода и воздухоподогревателя, разность этих сигналов, после обработки в КБ, поступает на вход автоматического регулятора экономичности. Однако, непрерывное измерение расхода пылевидного топлива затруднено. Поэтому, наиболее часто, расход пылевидного угольного топлива оценивают по косвенной величине (положению регулирующего органа), которая определяет частоту движения питателей. Следует отметить, что такой способ регулирования не учитывает качественного изменения состава и расхода топлива связанного с изменением скорости ленточного





симиацию значений параметров объекта. На рис. 3 представлена предлагаемая структура системы интеллектуального управления процессом горения, действующая на основе нейросетевого контроллера (НСК). На схеме информация от датчика скорости (который является задатчиком расхода топлива  $\mu_B$ ) поступает на вход НСК, который производит корректировку задания  $G_B^3$  регулятору воздуха, действующего по ПИД закону. Второй корректирующий регулятор – содержания кислорода  $PO_2$ , также действует по ПИД – закону. НСК обучен находить оптимальные корректирующие сигналы, исходя из значений текущего задания (зависящего от нагрузки) и расхода топлива. В случаях влияния на САУ глубоких внешних и внутренних возмущений, вызванных регулировочным или пусковыми режимами энергоблока ТЭС, НСК способен определить требуемое выходное значение  $G_B^3$  без дополнительной адаптации. Тогда как тра-

диционные САУ требуют включения адаптивных и пусковых регуляторов, ухудшающих качество процесса регулирования на период адаптации, например, выводя систему в автоколебательный режим [4].

Для моделирования интеллектуальной двухкантурной системы управления используется математический пакет MatLab с приложениями (Simulink, NeroToolbox) [10,11] (рис. 4).

**Компьютерный эксперимент**

В компьютерной модели (рис. 4), разработанной в программе MatLab (Simulink), верхний канал – управление расходом воздуха, нижний канал – корректировка по содержанию  $O_2$ .

На компьютерной модели, элемент Neural Network 2, является нейрорегулятором предназначенным для моделирования и прогнозирования процесса управления, исходя из значений задания (Step) и ошибки регулирования. Сигнал от Neural Network 2 поступает на

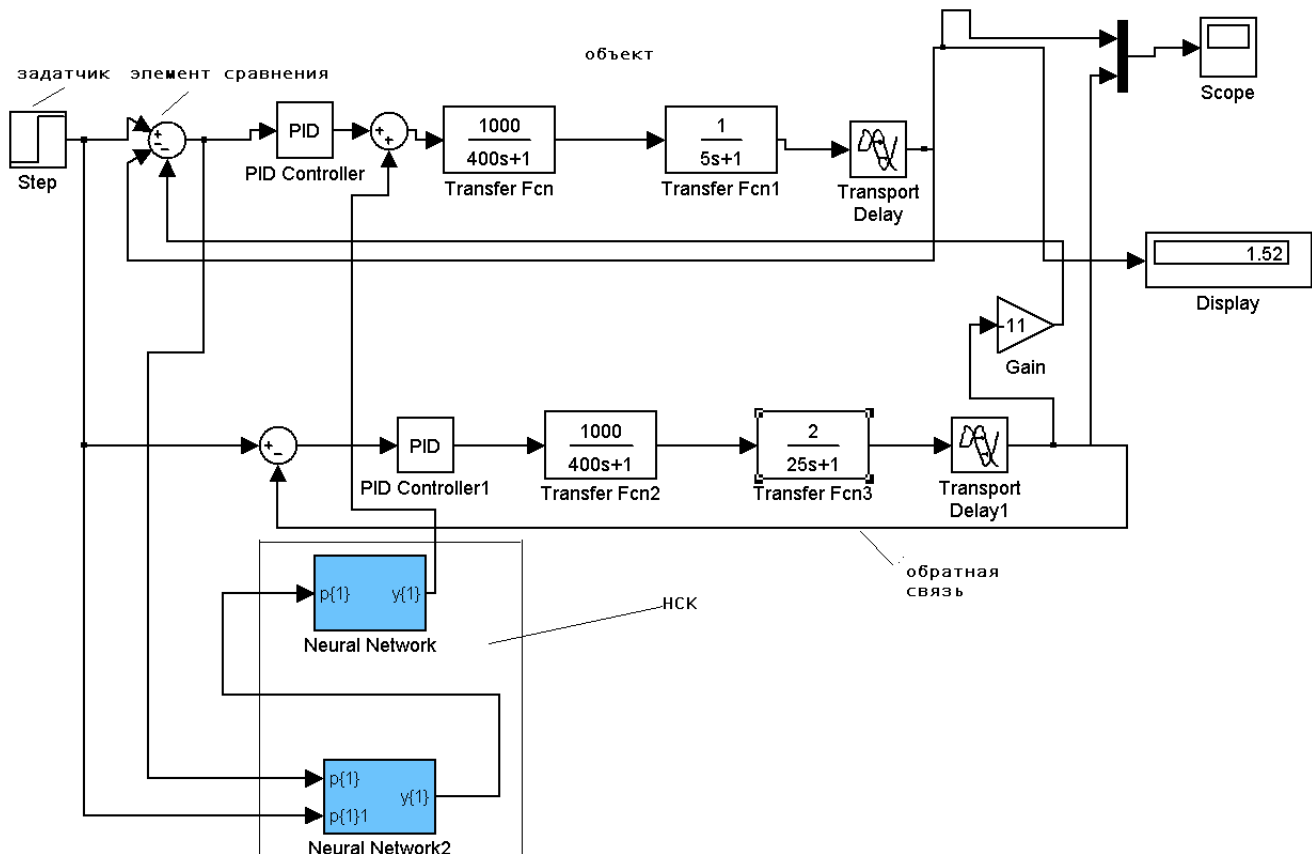


Рис. 4. Компьютерная модель нейроуправления процессом соотношения «топливо-воздух».

блок Neural Network, представляющий собой однослойную линейную нейронную сеть прямого распространения. Таким образом, НСК состоит из двух нейронных сетей последовательной структуры. Обучение нейроэмулятора проводилось в программе Neural Network с учетом рекомендаций [10], обучающей выборкой являлись параметры ошибки регулирования и задания, а также соответствующие им оптимальные прогнозные значения корректирующего воздействия, полученные в результате компьютерных экспериментов с моделью (рис. 4). Последовательная структура с нейроэмулятором была предложена в работе [12] и получила широкое распространение в зарубежных САУ промышленных объектов.

Предлагаемая структура нейроэмулятора, разработанная авторами с помощью программы Neural Network, показана на рис. 5. Значения весовых коэффициентов (weight), смещения (bias) и функции активации (purelin) были рассчитаны программой самостоятельно в процессе обучения. Переходные процессы нейросетевой САУ показаны на рис. 6.

Анализ переходных процессов регулирования продемонстрировал их апериодический характер с ожидаемым временем регулирования  $T_p = 400$  с. Дополнительные компьютерные исследования показали, что при изменении задания регуляторам, а также значений параметров объекта (в силу влияния внутренних возмущений – изменение нагрузки) по ка-

налам регулирования, интеллектуальная САУ продемонстрировала допустимое время регулирования и робастность в отличие от традиционной системы управления, нуждающейся в проведении этапов адаптации.

Предложенная структура нейросетевой САУ процесса горения топлива может быть использована на барабанных и прямоточных котлах разного давления, например, котлах: ТПЕ-429, БКЗ-210-140, Еп-920-17,6-543, Е-30-3,9-440Т и т.д., а также, с учетом применения специальных технических средств измерения, и для различного вида топлива. Внедрение интеллектуальных САУ в украинский ТЭК позволит добиться существенной экономии дорожающих энергоресурсов, исключить ошибки персонала, а также улучшить показатели качества управления энергоблоков в регулировочных и номинальных режимах, повысить их маневренность и КПД.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Розпорядження Кабінету Міністрів України № 145-р від 15.03.2006 р. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2030 року // [Електрон. ресурс]. – Спосіб доступу: <http://zakon.nau.ua>
2. Плетнев Г.П. Автоматизированное управление объектами тепловых электростанций. – М.: Энергоиздат, 1981. – 361 с.
3. Ключев А.С., Товарнов А.Г. Наладка систем автоматического регулирования котлоагрега-

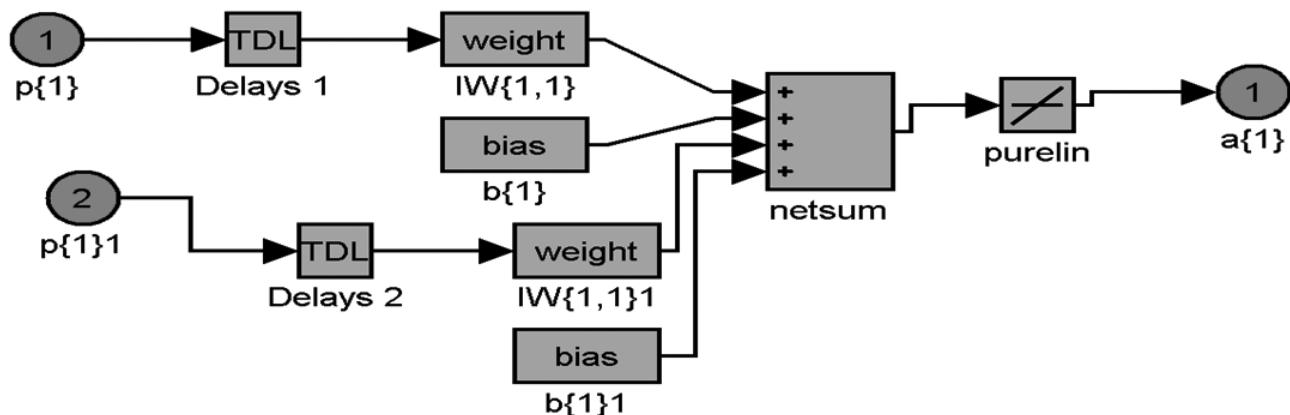
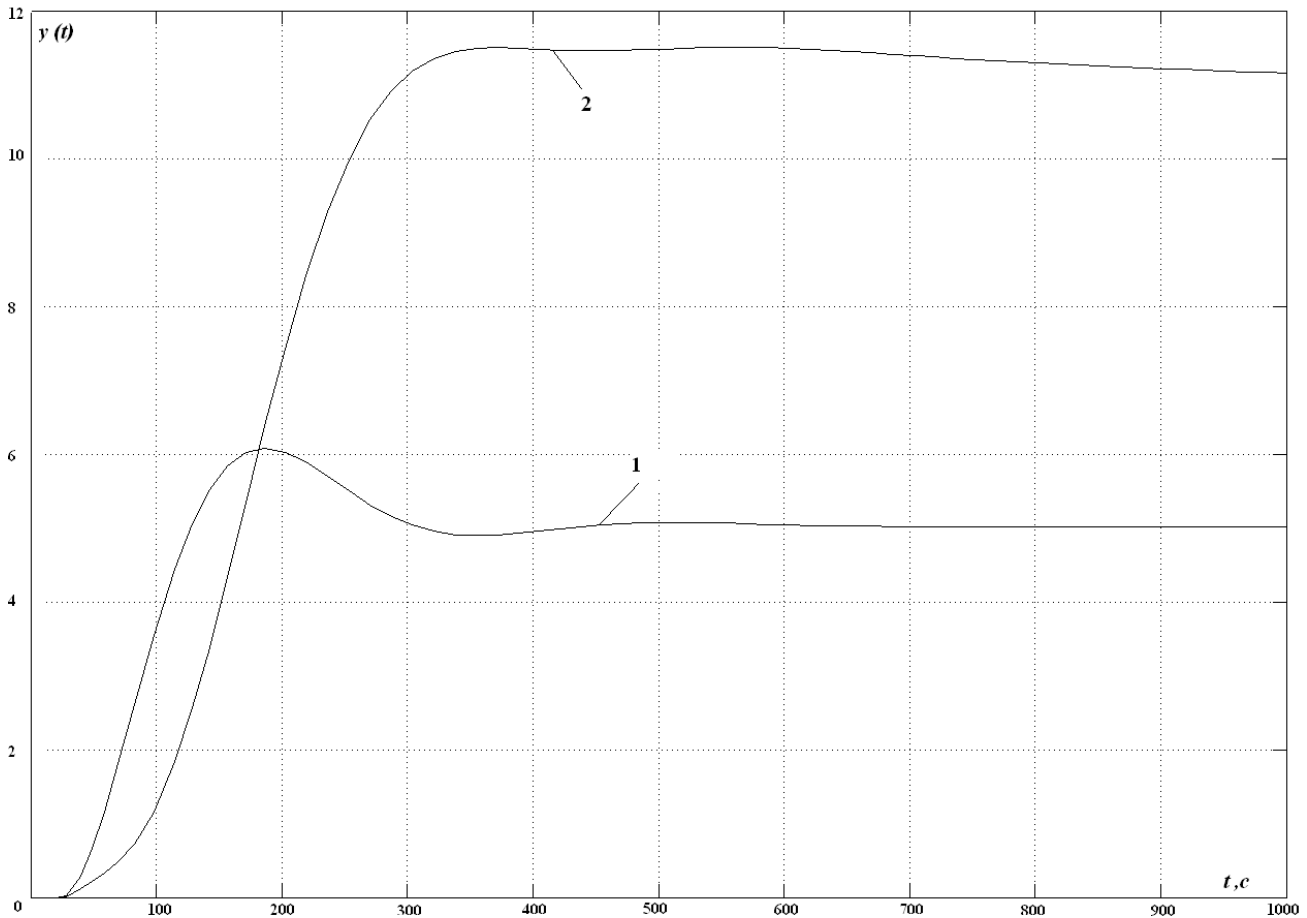


Рис. 5. Компьютерная модель нейроэмулятора в программе Neural Network.



**Рис. 6. Переходные процессы двухкантурной САУ по каналу задания:**  
**1 – процесс поддержания расхода топлива; 2 – процесс поддержания расхода воздуха.**

тов. – М.: Энергия, 1970. – 270 с.

4. Ротач В.Я. Теория автоматического управления // В.Я. Ротач. – М.: МЭИ, 2008. – 396 с.

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

6. Cass R., Radl B. A neural network modeling and optimization system for online heat rate Improvement and NOX reduction of coal fired furnaces // Proc. World Congress on Neural Networks, 2. Washington, DC, July 1993. – P. 656-659.

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. Monitoring and Control of Stoker-fired Boiler Plant using Neural Networks / UK Department of

Trade and Industry, DTI PS. – 156, July 1999.

9. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы // Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский; пер. с пол. И.Д. Рудинского. – М.: Горячая линия. – Телеком, 2006. – 452 с.

10. Медведев В.С., Потемкин В.Г. Нейронные сети. МАТЛАВ 6 – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2002 – 496 с.

11. Дьяконов В.П. Simulink 5/6/7: Самоучитель // В.П. Дьяконов. – М.: ДМК.–Пресс, 2008. – 781 с.

12. Сигеру О. Нейрокомпьютеры и их применение // Сигеру Омату, Марзуки Халид, Рубия Юсуф; пер. с англ. Н.В. Батина под. ред. А.И.Галушкина, В.А. Птичкина – М.: Изд. предприятие журн. “Радиотехника”, 2000. – 272 с.

Получено 22.05.2012 г.