

**Ключевые слова:** футеровка, деформация, ползучесть, доменная печь, керамика

A modified technique for modeling physical and chemical processes while heating lining materials used in blast furnaces is developed. The basic mechanisms of lining materials deformation under actual conditions of a blast furnace are defined. It is shown that a “saltatory” change in temperature characteristics of the lining may

take place at the first blow that is associated with phase transitions of a refractory material into another cristobalite form.

**Keywords:** lining, deformation, creep flow, blast furnace, ceramics

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук Г.В. Кузнецовим. Дата надходження рукопису 29.03.11

УДК 681.515: 519.7

В.И. Корниенко, д-р техн. наук,  
И.Г. Гулина

Государственное высшее учебное заведение  
„Национальный горный университет“, г. Днепропетровск,  
Украина, e-mail: vikor7@ukr.net

## ОБОСНОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМ СОСТОЯНИЕМ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

V.I. Korniyenko, Dr. Sci. (Tech.),  
I.G. Gulina

State Higher Educational Institution “National Mining  
University”, Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: vikor7@ukr.net

## SUBSTANTIATION OF CONSTRUCTION PRINCIPLES OF BLAST FURNACE THERMAL STATE CONTROL SYSTEMS

Выполнен анализ принципов построения систем автоматического управления тепловым состоянием доменной печи, исходя из особенностей доменного процесса как объекта управления. Рассмотрены методы робастного, адаптивного, оптимального, синергетического и нейросетевого управления. Обосновано, что повышение качества управления достигается путем создания безпоисковой системы непрямого адаптивного управления с идентификацией посредством обучения нейросетевых прогнозирующих моделей.

**Ключевые слова:** система управления, оптимальный регулятор, адаптация, идентификация, нейронная сеть, тепловое состояние, доменная печь

**Введение.** Доменное производство занимает значительную часть в структуре потребления ресурсов металлургическими переделами, поэтому актуальным является проведение исследований с целью снижения расходов на производство чугуна путем повышения качества систем автоматического управления (САУ) им.

С позиций управления доменный процесс (ДПР) является сложным объектом управления (ОУ), имеющим нелинейные зависимости, нестационарные параметры, зависимые (многосвязные) переменные, высокий уровень помех, а также значительную инерционность и время запаздывания [1].

Наиболее актуальным является совершенствование САУ тепловым состоянием (ТС) доменной печи (ДП), поскольку эта система создает условия, при которых наблюдается рациональное соотношение процессов прямого и косвенного восстановления железа, что позволяет достичь экономичности ДПР.

**Постановка задачи.** Использование математических моделей не только на стадии проектирования, но и в процессе функционирования систем, позволяет реализовать управление сложными технологическими процессами, поскольку проблема реализации адаптивных регуляторов такими ОУ определяется принципом внутренней модели [2].

Необходимость перехода к синтезу управления в процессе функционирования систем обусловлена отсутствием информации, достаточной для принятия решений во всех ситуациях, которые возникают при эксплуатации ДП. Кроме того, имеют место ограничения не только в отношении априорной и текущей информации, но и в отношении статистических характеристик различных шумов, возмущений и параметров. Экспериментальное же определение многомерных законов распределения вероятностей требуют совершенно недопустимых затрат.

Пусть динамика ОУ описывается нелинейным уравнением

$$x[k+1] = F\{x[k], u[k], w[k], \xi[k], a[k], k\},$$

где  $F$  – обобщенная функция (алгоритм) превращения;  $x[k], u[k], w[k], \xi[k], a[k]$  – векторы (матрицы) состояния процесса, его управления, возмущения, шумов и параметров до текущего времени  $k$ .

Управляющие воздействия формируются на основе наблюдений переменных, которые описывают ОУ, а стратегия управления базируется на априорной информации о характеристиках ОУ и на предыстории изменения входных и выходных переменных.

**Цель статьи.** Обоснование принципов построения систем и методов синтеза, обеспечивающих повышение качества управления ТС ДП.

**Обоснование принципов управления.** Когда свойства ОУ недостаточно известны, то применяются методы синтеза робастных регуляторов [2], которые обеспечивают малое изменение выхода замкнутой САУ при малом изменении параметров ОУ.

Однако в процессе функционирования робастной системы для управления не используется информация о неопределенностях в системе. Это приводит к тому, что такие системы консервативны, а их недостатками являются большая продолжительность переходных процессов и большие допустимые значения выходной координаты при действии помех.

Подобно робастной системе, адаптивная САУ также строится для ОУ, информация о которых или сведения о влияниях на которые недостаточно известны. При этом свойство адаптации достигается с помощью формирования в явном или неявном виде математической модели объекта или входного воздействия.

Задача синтеза адаптивной САУ формулируется как задача поиска управляющего вектора  $u[k]$  в виде функции координат состояния  $x[k]$ , возмущений и помех, который обеспечивает асимптотический переход ОУ из произвольного начального состояния в желаемое конечное с заданными динамическими характеристиками движения. При этом параметры  $a[k]$  могут неопределенным образом изменяться в некотором ограниченном диапазоне [2, 3].

Таким образом, основная особенность адаптивных систем управления – возможность получения информации в процессе функционирования и использование ее для управления. За счет этого адаптивное управление обеспечивает более высокое качество управления при наличии помех.

Главной задачей при создании САУ является синтез автоматических регуляторов, которые могли бы гарантировать асимптотическую устойчивость замкнутых систем и удовлетворить определенной совокупности требований к свойствам САУ.

Это задача синтеза регулятора, наилучшего в некотором смысле, которая решается с помощью теории аналитического конструирования оптимальных регуляторов (АКОР) Летова-Калмана [2].

Синтез оптимальных регуляторов базируется на концепции возмущенного движения Ляпунова и определяется как природой ОУ, так и видом критерия оптимальности.

Структура адаптивной оптимальной (АО) САУ (рис. 1) определяется принципом разделения (теоремой стохастической аппроксимации) [3], согласно которому такая система состоит из подсистемы оценивания и идентификации, а также подсистемы оптимального управления, построенной для условий точного измерения вектора состояния и вектора параметров, но использующей оценки этих величин (выходные сигналы подсистемы оценивания и идентификации).

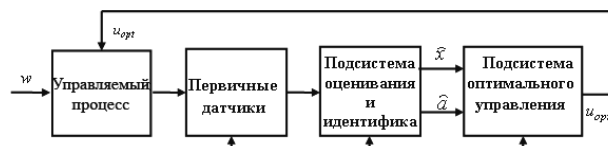


Рис. 1. Общая структура АО САУ

Управляемый процесс в условиях возмущений  $w$  наблюдается с помощью первичных датчиков с ошибками измерений  $\xi$ . Вектор сигналов наблюдения поступает в подсистему оценивания и идентификации, на выходе которой формируется оценка вектора состояния  $\hat{x}$  и оценка вектора параметров  $\hat{a}$  математической модели управляемого процесса. Подсистема оптимального управления на основе модели управляемого процесса, текущей оценки вектора состояния и критерия оптимизации  $J$  формирует оптимальное управление  $u_{opt}$ , которое влияет на управляемый процесс.

При классической реализации такие дуальные системы представляют собой сочетание фильтра Калмана-Бьюси и оптимального регулятора.

Однако, в теории АКОР непосредственно не рассматриваются общепринятые в инженерной практике прямые показатели качества синтезированных систем, а нерешенная задача проектирования регуляторов по заданным показателям качества была заменена другими, косвенно с ней связанные [4].

Синтез оптимального управления по АКОР сводится к решению уравнения Беллмана (Гамильтона-Якоби-Беллмана [2]), что для многомерных нелинейных ОУ встречает неразрешимые трудности, связанные с очень высокой размерностью при численном решении таких уравнений (аналитические методы решений таких уравнений не разработаны).

Развитием теории АКОР является принцип минимума обобщенной работы, разработанный академиком А.А. Красовским, согласно которому оптимизация управления осуществляется по функционалу обобщенной работы (ФОР) [2].

Преимущество метода АКОР по ФОР заключается в том, что его функциональное уравнение, в отличие от АКОР Летова-Калмана, представляет собой линейное дифференциальное уравнение в частных производных, которое имеет более простые решения.

САУ, реализующие данный метод, получили название универсальных. В них используются адаптивные оптимальные алгоритмы, основанные на автоматической идентификации посредством адаптивной прогнозирующей модели [3].

Вместе с тем, недостатком этого метода является то, что синтез управления многосвязными ОУ является относительно громоздким.

Для таких ОУ более эффективным считается си-нергетический подход, который позволяет синтези-

ровать единую САУ с иерархическим структурированием локальных систем (подсистем) [4].

Для применения синергетического подхода в САУ внешние воздействия подаются в виде информационных моделей, которые объединяют (агрегируют) эти воздействия в структуру расширенной системы. Тогда проблема управления формулируется как задача поиска законов взаимодействия в расширенной системе, где возникают процессы самоорганизации, то есть возникает конечное число аттракторов (принцип расширения-сжатия фазового пространства [4]).

Такой метод синтеза управления получил название аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) [4]. Он обеспечивает асимптотическую устойчивость системы без поиска решений нелинейных динамических уравнений ОУ. При этом оптимизируемый функционал является оценкой качества переходных процессов.

При использовании метода АКАР нелинейная динамика ОУ в пространстве состояний аппроксимируется линейной динамикой в пространстве макропеременных (аттрактора, желаемого режима работы). А задача подбора макропеременной сводится к задаче синтеза устойчивой однородной системы дифференциальных уравнений.

В методе АКАР синтез следующего уровня (нижнего, подчиненного) осуществляют с учетом уже синтезированной по своему критерию подсистемы предыдущего (верхнего) уровня.

Недостатком методов АКАР и АКОР является требование точного знания ОУ, что требует очень больших затрат на экспериментальные исследования по определению функций распределения, априорных и апостериорных вероятностей переменных ДПР.

Кроме того, эти методы относительно сложны в реализации, ориентированы на использование на этапе проектирования САУ и при наличии значительных запаздываний в ОУ возникают проблемы устойчивости замкнутых систем.

„Классические“ САУ построены на аналитическом описании ОУ в пространстве признаков. На практике же типичными являются плохо формализуемые ОУ с мало известными или переменными свойствами, для которых этот подход неэффективен.

„Неклассический“ подход в теории управления использует искусственные четкие и нечеткие нейронные сети (НС), что позволяет управлять нелинейными ОУ путем создания адаптивных САУ с обучаемым нейрорегулятором (НР) [5].

К преимуществам использования НР относятся их высокая эффективность для управления нелинейными нестационарными ОУ в областях промышленности, где накоплены большие базы данных, а также для управления многомерными и многосвязными ОУ с возмущенной средой функционирования. При этом НР имеют универсальные аппроксимирующие свойства и способность к обучению [6].

Использование НС позволяет решать задачу управления нелинейным ОУ путем создания адап-

тивной САУ с обучаемым НР и эталонной моделью (рис. 2) [7].



Рис. 2. Нейросетевая система управления с эталонной моделью

Необходимым условием функционирования САУ с эталонной моделью является правильный выбор обучающих входных воздействий  $q[k]$ , так как от их типа зависит точность настройки основного контура системы на эталонную модель.

Таким образом, главные проблемы (и недостатки) при создании систем с НР – это обоснование содержания и объема информации для обучения, а также выбор структуры регулятора и условий существования устойчивых решений для класса нелинейных ОУ и требуемых целей управления.

Адаптивные САУ основаны на сочетании оценивания состояния (наблюдения) и параметров модели (идентификации) ОУ с синтезом управления на основе прогнозирующих моделей, которые воспроизводят свободное движение ОУ.

В отличие от систем дуального управления, в адаптивных САУ выполнение этих процедур и организация их взаимодействия является не формализованным и допускает использование множества методов реализации.

При организации процесса адаптации используются методы [3]:

- поисковые, которые осуществляют итеративное движение к достижению требуемого качества управления;
- беспойсковые, которые используют достаточные условия требуемого качества управления (точность).

Наличие пробных движений является основным недостатком поисковой адаптации, т.к. они не всегда допустимы по условиям функционирования ДП.

В беспойсковых системах идентификация с адаптивной моделью получается за счет измерения входных и выходных воздействий.

Беспойсковые адаптивные системы (БАС) строятся по схеме прямого или непрямого адаптивного управления. В случае прямого управления измеряются характеристики модели и системы (временные, частотные), и на основании их рассогласования перестраиваются коэффициенты регулятора для его снижения к допустимой величине [2]. Их недостатком является требование к определению и обоснованию

эталонных характеристик ОУ, напрямую не связанных с эффективностью САУ.

В системах непрямого адаптивного управления предварительно производится идентификация ОУ, на основании чего вычисляются коэффициенты регулятора.

В БАС с эталонной моделью за ошибку контуров самонастройки принимается ошибка между движением ОУ и выходом модели  $e[k]$ .

Модель может настраиваться под динамические характеристики ОУ или всего основного контура, а полученные параметры модели далее используются для перестройки регулятора основного контура. Это БАС с идентификацией посредством настраиваемой модели (рис. 3).

В БАС же с собственной эталонной моделью (в которой настраиваются параметры основного контура под параметры эталонной модели) имеются существенные недостатки, обусловленные не только требованием априорной разработки эталонной модели, но и сложностями обеспечения устойчивости замкнутого основного контура (рис. 2).

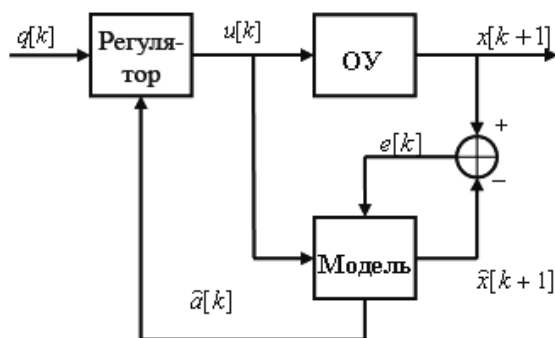


Рис. 3. Структура системы непрямого адаптивного управления с настраиваемой моделью

В БАС же с идентификацией посредством настраиваемой модели основной контур разомкнут (рис. 3), что обуславливает асимптотическую устойчивость этой САУ.

В БАС с идентификацией в качестве модели целесообразно использовать НС, которые, как отмечалось выше, являются универсальными и эффективными аппроксиматорами и способны к обучению (настройке). При этом, в качестве регулятора этой БАС могут использоваться как самонастраивающиеся, так и стандартные (ПИ, ПИД и др.) регуляторы.

Существование и единственность вектора настроек регуляторов по отношению к произвольно допустимому вектору параметров ОУ соответствует свойству адаптируемости основного контура. Полная адаптируемость основного контура обеспечивает абсолютную параметрическую инвариантность и служит структурной характеристикой адаптивного регулятора, выражающей предельные возможности компенсации влияния параметрических возмущений на динамические характеристики основного контура [2].

Учитывая, что каждый физический объект с нелинейной динамикой по-своему уникален, то и решение

задачи адаптивного управления также является уникальным и ограничено классом доступных моделей ОУ.

**Выводы.** От качества управления, обеспечиваемого адаптивными локальными САУ, зависит достижение эффективности работы ДП. Поэтому адаптивные САУ должны строиться как оптимальные, в смысле качества управления, что выражается в точности воспроизведения задающих воздействий.

Повышение качества управления ТС ДП достигается путем создания беспоисковых систем непрямого адаптивного управления с идентификацией ОУ посредством обучения нейросетевых прогнозирующих моделей.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку нейросетевых моделей ТС ДП.

### Список литературы / References

1. Каганов В.Ю. Автоматизация управления металлургическими процессами / В.Ю. Каганов, О.М. Блинов, А.М. Беленький. – М.: Metallurgiya, 1974. – 416 с.  
Kaganov V.Yu. Automatization of control of metallurgical processes / V.Yu. Kaganov, O.M. Blinov, A.M. Belenkiy. – М.: Metallurgiya, 1974. – 416 p.
2. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с.  
Reference book on the theory of automatic control. / Edited by A.A. Krasovskiy. – М.: Nauka, 1987. – 712 p.
3. Буков В.Н. Адаптивные прогнозирующие системы управления полетом / Буков В.Н. – М.: Наука, 1987. – 232 с.  
Bukov V.N. Adaptive predictive flight-control systems / Bukov V.N. – М.: Nauka, 1987. – 232 p.
4. Современная прикладная теория управления: Синергетический подход в теории управления / Под ред. А.А. Колесникова. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – Ч. II. – 559 с.  
Modern applied theory of control: Synergetic approach in the theory of control / Edited by A.A. Kolesnikov. – Taganrog: Publishing house of TRTU, 2000. – Part II. – 559 p.
5. Терехов В.А. Нейросетевые системы управления. Кн. 8. Учебное пособие для вузов / В.А. Терехов, Д.В. Ефимов, И.Ю. Тюкин.; Общ. редакция А.И. Галушкина. – М.: ИПРЖР, 2002. – 480 с.  
Terekhov V.A. Neuronet systems of control. Book 8. Tutorial for higher school / V.A. Terekhov, D.V. Yefimov, I.Yu. Tyukin.; Edited by A.I. Galushkin. – М.: IPRZHR, 2002. – 480 p.
6. Круглов В.В. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети / В.В. Круглов, М.И. Дли, Р.Ю. Голунов. – М.: Солон, 1996. – 348 с.  
Kruglov V.V. Fuzzy logic and artificial neuron networks / V.V. Kruglov, M.I. Dli, R.Yu. Golunov. – М.: Solon, 1996. – 348 p.
7. Махотило К.В. Применение искусственных нейронных сетей для решения задач управления / Махотило К.В. – <http://www.users.kpi.kharkov.ua/mahotilo>. – 11 с.  
Makhotilo K.V. Application of artificial neuron networks for the decision of control tasks / Makhotilo K.V. – <http://www.users.kpi.kharkov.ua/mahotilo>. – 11 p.

Виконано аналіз принципів побудови систем автоматичного керування тепловим станом доменної печі, виходячи з особливостей доменного процесу як об'єкту керування. Розглянуто методи робастного, адаптивного, оптимального, синергетичного та нейромережевого керування. Обґрунтовано, що підвищення якості керування досягається шляхом створення безпошукової системи непрямого адаптивного керування з ідентифікацією за допомогою навчання нейромережевих прогнозуючих моделей.

**Ключові слова:** система керування, оптимальний регулятор, адаптація, ідентифікація, нейронна мережа, тепловий стан, доменна піч

It is carried out the analysis of construction principles of automatic control systems for thermal state of blast-furnace on the base of the features of the blast-furnace process as the control object. It was examined the methods of robust, adaptive, optimal, synergetic and neuronet control. It is grounded that the upgrading of control is achieved by making of searchless system of indirect adaptive control with identification by means of neuronet predicting models learning.

**Keywords:** control system, optimal control, adaptation, identification, neuronet, thermal state, blast furnace

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.В. Слесаревим. Дата надходження рукопису 16.03.11

УДК 622.6-52

**В.В. Ткачев, д-р техн. наук, проф.,  
П.Ю. Огеенко,  
А.В. Лозовягин**

Государственное высшее учебное заведение „Национальный горный университет“, г. Днепропетровск, Украина, e-mail: tkachev@ukr.net

## ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ В ЗАДАЧАХ МИНИМИЗАЦИИ УДЕЛЬНЫХ ЭНЕРГОЗАТРАТ

**V.V. Tkachev, Dr. Sci. (Tech.), Professor,  
P.Yu. Ogeyenko,  
A.V. Lozovyagin**

State Higher Educational Institution “National Mining University”, Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: e-mail: tkachev@ukr.net

## DECENTRALIZED MANAGEMENT FOR SOLUTION OF SPECIFIC ENERGY CONSUMPTION MINIMIZATION PROBLEM

Рассмотрена проблема выбора сетевого решения при проектировании децентрализованной системы управления. Приведены требования к системе передачи информации при использовании децентрализованного подхода. Выполнен анализ наиболее распространенных полевых шин. По результатам анализа предложено использовать CAN шину. Описана физическая модель CAN сегмента для проведения экспериментов по тестированию возможностей CAN. Сделаны выводы по результатам исследований о децентрализованном управлении технологическими объектами.

**Ключевые слова:** децентрализация, распределение ограниченного ресурса, управление, полевая шина, CAN, модель, граф, исследование

Тенденции современного развития технологий автоматизации базируются на постепенном переходе от централизованных систем управления к системам, в которых центр управления как таковой отсутствует. Каждый узел таких систем можно считать в некотором роде интеллектуальным, так как устройство само принимает решение о необходимости выполнения тех или иных действий при управлении исполнительными механизмами. Этот подход принято называть децентрализованным управлением. Он основан на открытом информационном взаимодействии внутри коллектива сетевых модулей, в ходе которого происходит разделение управления технологическим процессом на ряд подзадач. Каждая из них выполняется устройством, непосредственно связанным с отдельным исполнительным механизмом. Таким образом, достижение определен-

ных системных целей осуществляется за счет решения локальных подзадач членами коллектива [1].

Использование децентрализованных систем управления в угледобывающей промышленности будет способствовать решению задачи повышения эффективности технологических процессов за счет снижения удельных энергозатрат при добыче угля.

Одной из базовых задач при проектировании децентрализованной системы управления является выбор сетевого решения. Технологические объекты, при автоматизации которых предпочтителен децентрализованный подход, в целом могут характеризоваться рядом следующих факторов: распределены в пространстве, сложная топология, большое число датчиков и исполнительных механизмов, помехообразующая среда, применение оборудования с различными интерфейсами ввода/вывода, необходимость быстрой реакции в соответствии с параметрами датчиков, большие объемы запрашиваемой информации. Наличие их значительно