

*На правах рукописи*



**ЕРЫШОВ Алексей Евгеньевич**

**ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА  
ПРОЦЕССАМИ СУШКИ В МНОГОСЕКЦИОННЫХ АППАРАТАХ**

05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы  
(технические науки)

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Тамбов 2008

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет» на кафедре "Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем"

**Научный руководитель** доктор технических наук, профессор  
*Муромцев Юрий Леонидович*

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор  
*Пономарев Сергей Васильевич*

кандидат технических наук, доцент  
*Ивановский Василий Андреевич*

**Ведущая организация:** ГОУ ВПО «Воронежская государственная технологическая академия»

Защита диссертации состоится **25 декабря 2008 г.** в 11:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212. 260. 05 ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет» по адресу: 392000. г. Тамбов, ул. Советская, 106, ТГТУ, Большой актовый зал.

Отзывы в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просим направлять по адресу: 392000. г. Тамбов, ул. Советская, 106, ТГТУ, ученому секретарю Селивановой З.М.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет».

Автореферат разослан 24 ноября 2008 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук, доцент

З.М. Селиванова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Одной из основных задач современной промышленности является повышение качества выпускаемой продукции с целью обеспечения ее конкурентоспособности. Важным резервом повышения качества и увеличения производительности является применение информационно-управляющих систем технологическими объектами. Примерами таких объектов являются тепловые аппараты, в частности, широко используемые в различных отраслях промышленности многосекционные сушильные установки.

Многосекционные сушильные установки являются системами с распределенными параметрами и как объекты управления характеризуются следующими основными особенностями. Вектор управления содержит два типа компонентов – общего действия (на весь аппарат) и частные (локальные); в качестве выходных переменных рассматриваются контролируемые величины в отдельных частях аппарата; основными показателями эффективности функционирования сушильной установки являются качество получаемого продукта и производительность; управляющее устройство вырабатывает воздействия, которые должны учитывать возможные изменения ситуаций, обусловленные наличием временно-го запаздывания между управляющими воздействиями и выходными переменными. Для учета этих особенностей информационно-управляющая система (ИУС) должна реализовывать алгоритмы, позволяющие оперативно контролировать влагосодержание материала, идентифицировать текущее состояние функционирования объекта и своевременно реагировать на изменения основных режимных параметров процесса. При этом необходимо также учитывать неполноту и неточность данных, влияющих на процесс сушки в отдельных секциях. Поэтому при разработке математического и алгоритмического обеспечения ИУС широко применяются алгоритмы управления, использующие методы искусственного интеллекта.

Теоретические вопросы анализа и синтеза оптимального управления процессами сушки с учетом смены состояний функционирования объекта в процессе реальной эксплуатации тепловых аппаратов исследованы недостаточно. В связи с этим разработка моделей, методов и алгоритмов для ИУС, решающей в реальном времени задачи повышения качества продукции и производительности процессов сушки, является своевременной и актуальной задачей.

**Цель научного исследования** заключается в повышении качества выпускаемой продукции и производительности многосекционных сушильных установок на основе разработки и внедрения информационно-управляющей системы процессами сушки.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- сформулировать задачи управления режимами сушки в многосекционных сушильных установках;

- разработать математические модели для оперативного получения информации о влагосодержании материала, которая необходима при решении задач управления сушильной установкой;

- создать виртуальный датчик влагосодержания материала, позволяющий в реальном времени, бесконтактным способом определять влагосодержание материала в секциях многосекционных установок;

- выделить лимитирующие секции, в которых происходит наиболее интенсивный влагосъем и разработать процедурную модель для прогнозирования качества конечного продукта по значениям влагосодержания материала в этих секциях;

- разработать алгоритм управления процессом сушки, позволяющий обеспечить качество выпускаемой продукции не хуже требуемого при максимально возможной производительности;

- разработать ИУС, осуществляющую решение задач управления процессом сушки в многосекционной установке.

**Объектом исследования** является информационно-управляющая система процессами сушки в многосекционных аппаратах.

**Предметом исследования** являются математическое, алгоритмическое и программное обеспечения информационно-управляющих систем процессами сушки в многосекционных аппаратах.

**Методы исследований.** В работе использованы методы математического моделирования сложных систем, анализа и синтеза оптимального управления на множестве состояний функционирования, положения системного анализа, теории нечетких множеств и нейронных сетей, разработки ИУС с использованием CASE и CALS-технологий, функционального (IDEF/0) и информационного (IDEF1x) моделирования, объектно-ориентированного и визуального программирования.

### **Научная новизна работы.**

1. Сформулированы общая и частные задачи оптимизации режимов работы сушильной установки, предложен алгоритм управления процессами сушки в многосекционных сушильных установках, основанный на применении нечеткой логики, отличающийся от существующих оперативным устранением отклонения влагосодержания материала в различных точках по длине аппарата от допустимых значений, учитывающий влияние большого числа возмущающих воздействий, обеспечивающий повышение качества выпускаемой продукции и производительности процесса.

2. Разработаны аналитические модели, основанные на нейронных сетях, отличающиеся от существующих определением влагосодержания движущегося материала в различных точках по длине сушильной установки, пригодные для решения задач управления режимами сушки.

3. Разработана процедурная модель для расчета меры доверия к достижению требуемого влагосодержания материала на выходе сушилки по значениям влагосодержания материала в лимитирующих секциях, пригодная для классифи-

кации возможных ситуаций в многосекционной сушильной установке и выработки управляющих воздействий, отличающаяся от существующих использованием накопленного опыта экспертов и применением метода Демпстера-Шафера.

4. Введено понятие ситуации многосекционной сушильной установки, применительно к решаемым задачам управления и сформировано множество ситуаций, характеризующих различные состояния аппарата. Выделены классы ситуаций, которым соответствуют определенные виды задач управления режимами сушки.

5. Создан виртуальный датчик, отличающийся бесконтактным способом оперативного определения влагосодержания материала в процессе сушки.

6. Предложена методика построения виртуальных датчиков влагосодержания материала в секциях сушильной установки на основе нейронных сетей.

7. Разработана ИУС, использующая виртуальный датчик влагосодержания материала, осуществляющая решение задач управления процессами сушки в многосекционной сушильной установке.

**Практическая значимость.** Разработаны программные модули информационно-управляющей системы. Создан виртуальный датчик, позволяющий определять влагосодержание движущегося материала в реальном времени. Разработано алгоритмическое обеспечение информационно-управляющей системы процессами сушки в многосекционной установке. Внедрение данной системы позволило увеличить вероятность выхода качественной продукции до 0,98, а также повысить производительность процессов сушки на 5%.

**Реализация работы.** Разработанная информационно-управляющая система внедрена на ОАО «Тамбовский завод «Октябрь». Материалы исследований используются в учебном процессе кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет».

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

- постановки задач управления режимами сушки, в которых учитывается множество ситуаций в многосекционной сушильной установке и минимизируются потери от снижения качества продукции и производительности;

- аналитические модели, позволяющие определять влагосодержание движущегося материала в различных точках по длине сушилки, пригодные для решения задач управления режимами сушки;

- процедурная модель определения меры доверия к достижению требуемого влагосодержания материала на выходе сушилки по методу Демпстера-Шафера, пригодная для классификации возможных ситуаций в многосекционной сушильной установке и выработки управляющих воздействий;

- виртуальный датчик, позволяющий в реальном времени получать информацию о влагосодержании материала в лимитирующих секциях, которая необходима для функционирования ИУС;

- методика построения виртуальных датчиков влагосодержания движущегося материала в многосекционных сушильных установках;

- алгоритм управления процессом сушки, позволивший оперативно устранять отклонения влагосодержания материала в лимитирующих секциях сушилки, с учетом множеств состояний функционирования и возмущающих воздействий;

- ИУС, использующая виртуальный датчик влагосодержания материала, позволившая решать задачи повышения качества конечной продукции и производительности сушильной установки.

**Апробация работы.** Основные результаты работы представлялись и обсуждались на следующих конференциях: VI международной теплофизической школе (МТФШ-6) «Теплофизика в энергосбережении и управлении», Тамбов: ТГТУ, 2007 г.; IV международной заочной научно-практической конференции «Глобальный научный потенциал», Тамбов: ТГТУ, 2008 г.

**Публикации.** Основные научные результаты по теме диссертации опубликованы в 9 работах, из них 2 статьи в журналах, рекомендуемых ВАК РФ для публикации основных результатов диссертации, 5 статей и 3 доклада.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 112 страницах, содержит 20 рисунков и 9 таблиц. Библиографический список литературы включает 145 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** показана актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, отмечена научная новизна, практическая значимость и достоверность полученных результатов, приведены положения, выносимые на защиту. Дана аннотация работы по главам.

В первой главе «**Литературный обзор и постановка задачи исследования**» рассмотрены существующие информационно-управляющие системы энергоемкими объектами. Отмечены особенности управления режимами работы сушильных установок, применяемых для сушки материалов. Произведен анализ способов и средств измерения влажности. На основе проведенного анализа поставлена цель и сформулированы задачи диссертационной работы.

Во второй главе «**Задачи управления и процедурно-аналитическое моделирование влагосодержания материала**» приведено описание сушильной установки, которая представляет собой коридор, разделенный на секции, в котором размещена лента транспортера и ворошитель. Пастообразный материал, уложенный на ленту и сушильный агент (сушильным агентом является нагретый воздух) движутся в коридоре противоточно, в каждой секции обеспечивается подогрев сушильного агента в паровых калориферах. При помощи воздухозаборных окон регулируется приток сушильного агента в секции, а сбросные шиберы и вытяжной вентилятор отвечают за отвод отработанного сушильного агента. Исходя из кинетики процесса сушки, в установке можно выделить несколько секций, в которых удаляется основная часть влаги, содержащейся в ма-

териале. Например, для пятисекционной сушилки это вторая и третья секции. В них удаляется около 73% от начального количества влаги  $\varphi_n$  содержащейся материале. Эти секции будем называть лимитирующими, т.к. протекающий в них процесс во многом определяет качество конечного продукта.

Сформулированы задачи определения влагосодержания и управления процессом в многосекционных сушильных установках. Разработаны аналитические и процедурная модели определения влагосодержания материала в процессе сушки, позволяющие в реальном времени решать задачи повышения качества продукции.

Общая задача управления процессами сушки формулируется следующим образом. Задаются:

- оператор  $f$ , позволяющий определять влагосодержание материала в лимитирующих секциях и на выходе сушильной установки  $y = (y_1, \dots, y_Z)$  в зависимости от значений вектора управляющих воздействий  $u = (u_1, \dots, u_P)$ , возмущающих воздействий  $x = (x_1, \dots, x_H)$  при различных ситуациях функционирования  $S = \{s_l(\cdot), l = \overline{1, L}\}$ ,

$$f : U \times X \times S \rightarrow Y, \quad (1)$$

где  $U, X, Y, S$  – множества значений управляющих, возмущающих воздействий, выходных переменных и изменений ситуаций соответственно;

- ограничения на значения выходных переменных  $y$  и изменение управляющих воздействий  $u$ , т.е.

$$y_z \in Y_z^{\text{доп}}, z = \overline{1, Z}; \quad (2)$$

$$u_p \in U_p^{\text{доп}}, p = \overline{1, P}, \quad (3)$$

где  $Y_z^{\text{доп}}, U_p^{\text{доп}}$  – области допустимых значений  $y_z$  и  $u_p$  соответственно;  $Z, P$  – число выходных переменных и управляющих воздействий соответственно;

- критерий оптимальности, характеризующий качество продукции (К) и производительность (Пр) работы объекта, вида

$$Q = Q(\Delta K, \Delta \text{Пр}, u) \rightarrow \min_u, \quad (4)$$

где  $\Delta K, \Delta \text{Пр}$  – потери, вызванные снижением качества и производительности соответственно.

Требуется определить такое значение управляющего воздействия  $u^*$ , при котором выполняются ограничения (2), (3) и критерий (4) достигает минимального значения.

Компонентами вектора выхода  $y$  являются влагосодержание материала на выходе лимитирующих секций и самой сушилки. Применительно к пятисекционной сушильной установке (рис. 1) это влагосодержание в конце второй  $\varphi_2^K$ ,

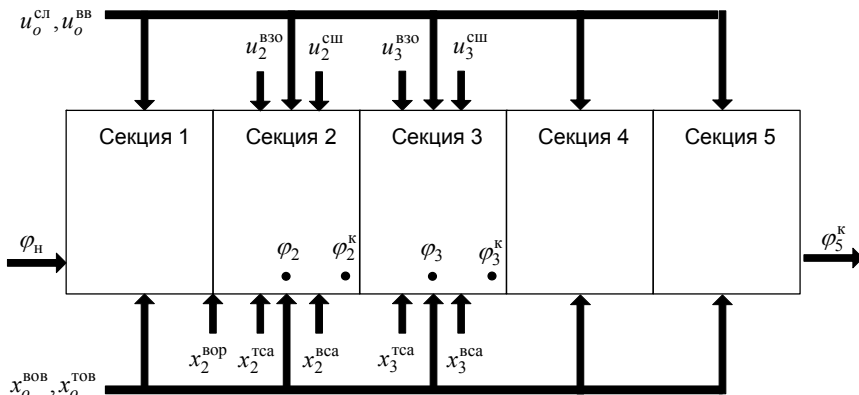
третьей  $\varphi_3^K$  и пятой  $\varphi_5^K$  секций, а векторы управляющих  $u$  и возмущающих  $x$  воздействий записываются в виде

$$u = (u_o^{сл}, u_2^{взо}, u_2^{сш}, u_3^{взо}, u_3^{сш}, u_o^{вв}); \quad (5)$$

$$x = (\varphi_n, \varphi_2^K, x_2^{тса}, x_2^{вса}, x_2^{вор}, x_3^{тса}, x_3^{вса}, x_o^{тов}, x_o^{бов}), \quad (6)$$

где  $u_2^{взо}, u_2^{сш}, u_3^{взо}, u_3^{сш}$  - управление воздухозаборными окнами и сбросными шиберами второй и третьей секций соответственно;  $u_o^{вв}$  - управление работой вытяжного вентилятора;  $u_o^{сл}$  - управление скоростью движения ленты транспортера;  $x_2^{тса}, x_2^{вса}$  - температура и влажность сушильного агента во второй секции соответственно;  $x_2^{вор}$  - положение ворошителя на входе второй секции;  $x_3^{тса}, x_3^{вса}$  - температура и влажность сушильного агента в третьей секции соответственно;  $x_o^{тов}, x_o^{бов}$  - температура и влажность окружающего воздуха соответственно.

Основным компонентом вектора управляющих воздействий  $u$  является скорость движения ленты транспортера. В случае необходимости также могут использоваться воздухозаборные окна и сбросные шиберы соответствующих секций сушильной установки.



**Рис. 1. Структура пятисекционной сушилки как объекта управления**

Учитывая, что компоненты векторов  $y$  и  $u$  относятся к разным секциям сушильной установки, дополнительно к общей задаче рассматриваются две частные задачи управления процессами сушки применительно к отдельным партиям движущегося материала. В данном случае под партией понимается количество материала находящегося в одной секции. Математически первая частная задача применительно к  $m$ -ой партии материала может быть записана следующим образом. Задаются:



- модель, позволяющая определять влагосодержание материала в центре второй секции сушильной установки, т.е.

$$\varphi_2(t_2^m) = f(u_2, x_2, A_2), \quad (7)$$

где  $t_2^m$  - момент времени определения влагосодержания  $m$ -ой партии материала во второй секции;  $u_2, x_2$  - векторы управляющих и возмущающих воздействий во второй секции;  $A_2$  - массив параметров модели для определения влагосодержания материала в центре второй секции;

- ограничения на изменение  $u_2$  и  $\varphi_2$

$$u_2 \in U_2^{\text{доп}}, \quad (8)$$

$$\varphi_2 \in Y_2^{\text{доп}}, \quad (9)$$

где  $U_2^{\text{доп}}, Y_2^{\text{доп}}$  - области допустимых значений  $u_2$  и  $\varphi_2$ ;

- минимизируемый функционал

$$Q_2 = c_1 \Delta K(u_2) + c_2 \Delta \text{Пр}(u_2) \rightarrow \min_{u_2}, \quad (10)$$

где  $c_1, c_2$  - весовые коэффициенты.

Требуется при прохождении  $m$ -ой партии материала второй секции с помощью модели (7) определить влагосодержание материала и если оно выходит за допустимые пределы (9), то выработать оптимальное корректирующее воздействие

$$u_2^* = \arg \min_{u_2} Q_2(\Delta K, \Delta \text{Пр}, c_1, c_2, u_2), \quad (11)$$

при этом должно выполняться ограничение (8).

Векторы  $u_2$  и  $x_2$  воздействий содержат следующие компоненты

$$u_2 = (u_o^{\text{сл}}, u_2^{\text{взо}}, u_2^{\text{сп}}, u_o^{\text{вв}}); \quad (12)$$

$$x_2 = (\varphi_n, x_2^{\text{тса}}, x_2^{\text{вса}}, x_2^{\text{вор}}, x_o^{\text{тов}}, x_o^{\text{вов}}). \quad (13)$$

Аналогично формулируется вторая частная задача для третьей секции сушилки.

Исходя из особенностей процессов в сушильных установках, организация непосредственного измерения в реальном времени влагосодержания материала в секциях представляется весьма затруднительной. Для решения этой проблемы при моделировании предлагается использовать искусственные нейронные сети. Полученные с помощью нейронных сетей (многослойный персептрон), содержащих в себе по 3 слоя - входной, скрытый и выходной. Например, аналитические модели для определения влагосодержания материала в конце второй и третьей секций, используемые при решении общей задачи управления режимами сушки имеют вид

$$\varphi_2^{\text{K}} = \left[ 1 + \exp\left(-\beta_{\text{BYX}}^{(2)} \cdot \left[\sum_{j=1}^{N_2} w_j^{(2\text{BYX})} \cdot \left(1 + \exp\left(-\beta_j^{(2)} \cdot \left[w_{1,j}^{(2)} \cdot \varphi_{\text{H}} + w_{2,j}^{(2)} \cdot x_o^{\text{TOB}} + \right.\right.\right.\right)\right.\right.\right.$$
  

$$+ w_{3,j}^{(2)} \cdot x_o^{\text{BOB}} + w_{4,j}^{(2)} \cdot u_o^{\text{CП}} + w_{5,j}^{(2)} \cdot x_2^{\text{TCA}} + w_{6,j}^{(2)} \cdot x_2^{\text{BCA}} + w_{7,j}^{(2)} \cdot u_o^{\text{BB}}$$
  

$$\left.\left.+ w_{8,j}^{(2)} \cdot x_2^{\text{BOP}} + w_{9,j}^{(2)} \cdot u_2^{\text{B3O}} + w_{10,j}^{(2)} \cdot u_2^{\text{CШ}} - \theta_j^{(2)}\right) \right]^{-1} \cdot \left[-\theta_{\text{BYX}}^{(2)}\right]$$
  

$$\left.\right]^{-1}; \quad (14)$$

$$\varphi_3^{\text{K}} = \left[ 1 + \exp\left(-\beta_{\text{ВЫХ}}^{(3)} \cdot \left[\sum_{j=1}^{N_3} w_j^{(3\text{ВЫХ})} \cdot \left(1 + \exp\left(-\beta_j^{(3)} \cdot [w_{1,j}^{(3)} \cdot \varphi_2^{\text{K}} + w_{2,j}^{(3)} \cdot x_o^{\text{TOB}} + \right.\right.\right.\right.\right. \\ \left.\left.\left.+ w_{3,j}^{(3)} \cdot x_o^{\text{BOB}} + w_{4,j}^{(3)} \cdot u_o^{\text{СП}} + w_{5,j}^{(3)} \cdot x_3^{\text{TCA}} + w_{6,j}^{(3)} \cdot x_3^{\text{BCA}} + w_{7,j}^{(3)} \cdot u_o^{\text{BB}} + \right.\right. \\ \left.\left.\left.+ w_{8,j}^{(3)} \cdot u_3^{\text{BZO}} + w_{9,j}^{(3)} \cdot u_3^{\text{СШ}}\right] - \theta_j^{(3)}\right)\right)^{-1}\right] - \theta_{\text{ВЫХ}}^{(3)} \Bigg)^{-1}, \quad (15)$$

где  $w_{i,j}^{(2)}, w_j^{(2\text{вых})}$  - весовые коэффициенты связей нейронов скрытого и выходного слоев нейронной сети для расчета  $\varphi_2^k$ ,  $j=1,2,\dots,N_2$ ;  $N_2$  - число нейронов в скрытом слое сети для расчета  $\varphi_2^k$ ;  $w_{i,j}^{(3)}, w_j^{(3\text{вых})}$  - весовые коэффициенты связей нейронов скрытого и выходного слоев нейронной сети для расчета  $\varphi_3^k$ ,  $j=1,2,\dots,N_3$ ;  $N_3$  - число нейронов в скрытом слое сети для расчета  $\varphi_3^k$ ;  $\beta_j^{(2)}, \beta_{\text{вых}}^{(2)}, \theta_j^{(2)}, \theta_{\text{вых}}^{(2)}$  - углы наклона и сдвиги сигмоидальных активационных функций нейронов скрытого и выходного слоев нейронной сети для расчета  $\varphi_2^k$ ;  $\beta_j^{(3)}, \beta_{\text{вых}}^{(3)}, \theta_j^{(3)}, \theta_{\text{вых}}^{(3)}$  - углы наклона и сдвиги сигмоидальных активационных функций нейронов скрытого и выходного слоев нейронной сети для расчета  $\varphi_3^k$ . Аналогичные модели построены для определения влагосодержания материала в центре второй и третьей секций.

Полученные аналитические модели позволяют в реальном времени определять влагосодержание материала в лимитирующих секциях сушильной установки. Относительная погрешность определения влагосодержания не превышает 2%. Для оценки адекватности на рис. 2 показана зависимость влагосодержания  $\varphi_2^k$ , рассчитанного по модели (14), от экспериментального  $\varphi_{2,\varepsilon}^k$  в виде корреляционной диаграммы.

Анализ аналитической модели для пятой секции сушильной установки показал ее недостаточную точность вследствие малого абсолютного значения

влажностисодержания материала  $\varphi_k$ . Поэтому в ИУС предлагается использовать итерационную процедуру определения меры доверия  $m(\varphi_k)$  к достижению требуемого влажностисодержания материала на выходе сушильной установки, в зависимости от значений влажностисодержания материала в лимитирующих секциях по методу Демпстера-Шафера, а также экспертных оценок, т.е.

$$m(\varphi_k) = \text{Алг}_{\text{ДШ}}(\varphi_2^k, \varphi_3^k, \varepsilon), \quad (16)$$

где  $\text{Алг}_{\text{ДШ}}$  - алгоритм метода Демпстера-Шафера;  $\varepsilon$  - высказывания экспертов в виде числовых оценок результатов сушки в зависимости от влажностисодержания материала в лимитирующих секциях.

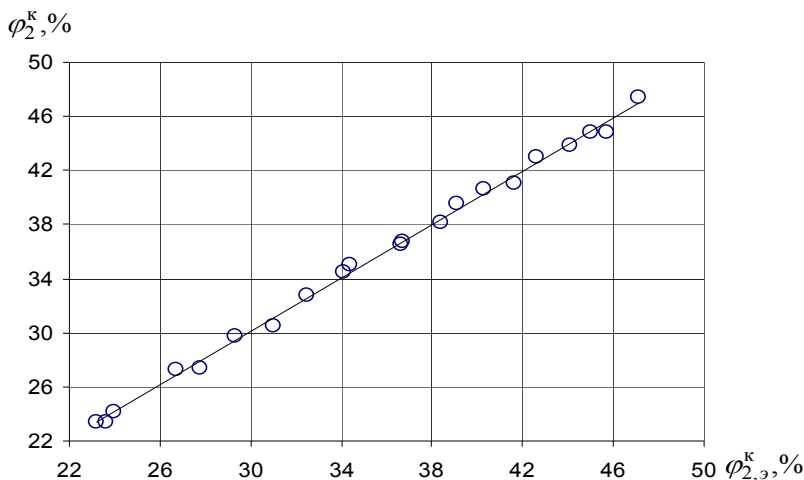


Рис. 2. Корреляционная диаграмма влажностисодержания материала на выходе второй секции

Разработанные модели положены в основу виртуального датчика влажностисодержания материала (ВДВ).

В третьей главе «Алгоритмическое обеспечение информационно-управляющей системы» рассматриваются алгоритмы управления процессами сушки, позволяющие обеспечить уровень качества материала не хуже заданного, при максимально возможной производительности установки. Основным показателем качества материала является его конечное влажностисодержание  $\varphi_k$ . Достижение необходимого уровня качества материала требует постоянного мониторинга его влажностисодержания в лимитирующих секциях сушилки с использованием полученной информации для выработки управляющих воздействий и своевременной коррекции процесса сушки.

ВДВ работает с входными данными двух видов статическими и динамическими. К статическим относятся заранее определяемые данные такие как:

структуры нейронных сетей, массивы их параметров, амплитудные и офсетные коэффициенты нормализации входных и денормализации выходных данных модели. К динамическим относятся данные, получаемые ВДВ путем опроса датчиков, установленных в сушильной установке.

Решать поставленную задачу управления процессом сушки предлагается с использованием подхода полного анализа оптимального управления на множестве состояний функционирования. В соответствии с классификацией систем на МСФ, сушилка с управляющим устройством относится к четвертому классу. Для эффективного функционирования таких систем важную роль играет выполнение условий включаемости.

Основное положение данного подхода рассмотрено на примере сушильной установки с пятью секциями (рис. 1). В этом случае вектор выходных переменных имеет вид  $y = (\varphi_2, \varphi_3, m(\varphi_k))$ . В качестве элементов множества  $\mathbf{S}$  возможных траекторий изменения ситуаций (состояний функционирования)  $s_l(\cdot)$ , т.е.

$$\mathbf{S} = \{s_l(\cdot), l = \overline{1, L}\}, \quad (17)$$

рассматриваются отклонения значений влагосодержания материала в  $z$ -ой секции от требуемого по регламенту значение влагосодержания материала  $\bar{y}_z$ . Само множество  $\mathbf{S}$  удобно задавать в форме морфологической таблицы. Предполагается, что элемент  $s_l(\cdot) \in \mathbf{S}$  задается тремя компонентами, т.е.  $s_l(\cdot) = (s_{l2}, s_{l3}, s_{l5})$ , компоненты  $s_{l2}, s_{l3}$  могут принимать пять значений, а компонент  $s_{l5}$  три значения:

$$s_{lz} = \begin{cases} s_{lz}^{\text{ННД}}, & \text{если } y_z < (\bar{y}_z - \delta_z^{(2)}), \\ s_{lz}^{\text{НД}}, & \text{если } y_z \in [\bar{y}_z - \delta_z^{(2)}, \bar{y}_z - \delta_z^{(1)}], \\ s_{lz}^{\text{Д}}, & \text{если } y_z \in [\bar{y}_z - \delta_z^{(1)}, \bar{y}_z + \delta_z^{(1)}], \\ s_{lz}^{\text{ВД}}, & \text{если } y_z \in (\bar{y}_z + \delta_z^{(1)}, \bar{y}_z + \delta_z^{(2)}], \\ s_{lz}^{\text{НВД}}, & \text{если } y_z > (\bar{y}_z + \delta_z^{(2)}), \quad z = 2, 3; \end{cases} \quad (18)$$

$$s_{l5} = \begin{cases} s_{l5}^{\text{Н}}, & \text{если } y_5 < 0,65, \\ s_{l5}^{\text{СР}}, & \text{если } y_5 \in [0,65; 0,8], \\ s_{l5}^{\text{В}}, & \text{если } y_5 > 0,8, \end{cases} \quad (19)$$

где  $\delta_z^{(1)}, \delta_z^{(2)}$  – задаваемые отклонения  $y_z$  от  $\bar{y}_z$ ,  $\delta_z^{(1)} < \delta_z^{(2)}$ ;  $L$  – число возможных ситуаций; ННД – влагосодержание материала намного ниже допустимого; НД – влагосодержание материала ниже допустимого; Д – влагосодержание материала допустимое; ВД – влагосодержание материала выше допустимого;

НВД – влагосодержание материала намного выше допустимого; Н – мера доверия низкая; СР – мера доверия средняя; В – мера доверия высокая;

В этом случае множество  $S$  содержит  $L = 75$  различных ситуаций. По результатам анализа эти ситуации разделяются на пять классов:  $K_o, K_{пр}, K_2, K_3, K_{2,3}$ . В зависимости от того, к какому классу принадлежит ситуация  $s_l(\cdot)$ , решается общая или частная задача управления.

Работа алгоритма управления режимами сушки с учетом введенных классов ситуаций заключается в следующем. В момент времени  $t$  для расчета управляющих воздействий используется информация:

- значения влагосодержания материала в лимитирующих секциях, определенные по аналитическим моделям;
- мера доверия к требуемому конечному влагосодержанию материала, рассчитанная по процедурной модели;
- значения компонентов вектора управляющих воздействий  $u(t - \Delta t)$ , на предыдущем шаге.

Кроме того, в памяти управляющего устройства содержится информация о множестве возможных ситуаций, классах ситуаций, системе продукционных правил и функциях принадлежности лингвистических переменных, в качестве которых рассматривается влагосодержание материала в соответствии с формулами (18), (19).

На первом этапе на основе полученной информации формируется подмножество ситуаций  $S(t) \subset S$ .

На втором этапе определяется класс ситуаций, учитывающий особенности алгоритма управления. Если все элементы подмножества  $S(t)$  принадлежат классу  $K_o$ , то сохраняется режим работы с управлением  $u(t - \Delta t)$ . Если все элементы подмножества  $S(t)$  принадлежат классу  $K_{пр}$ , то решается задача повышения производительности аппарата при ограничении на качество конечного материала. Если все или часть элементов подмножества  $S(t)$  принадлежат классам  $K_2, K_3$  или  $K_{2,3}$ , то решаются частные задачи управления режимами во второй и третьей секциях сушки.

На третьем этапе производится выбор алгоритма управления в зависимости от класса ситуаций, производится пересчет управляющих воздействий с учетом ограничений (3) при помощи нечеткой логики с использованием алгоритма Мамдани. Преобразование (дефаззификация) нечетких подмножеств в численные значения управляющих воздействий осуществляется различными методами.

На четвертом этапе на основе полученных значений формируется интервал допустимого изменения управляющих воздействий  $u_{доп}^{сл}$ . Для данного интервала производится расчет функционала, учитывающего потери качества и производительности

$$Q = c_1(a_0 + a_1\tilde{u}_o^{cl}) + c_2(b_0 + b_1(\tilde{u}_o^{cl})^2) \rightarrow \min_{u_o^{cl} \in u_{доп}^{cl}}. \quad (20)$$

Рассмотренный алгоритм управления процессом сушки позволяет обеспечить качество продукции не хуже заданного и максимально возможную производительность при изменениях состояний функционирования (ситуаций). Для реализации алгоритма необходимо создание информационно-управляющей системы процессами сушки.

В четвертой главе «**Реализация информационно-управляющей системы процессами сушки в многосекционных аппаратах**» описывается процесс проектирования и реализации информационно-управляющей системы процессами сушки в многосекционных аппаратах. Приведены структуры базы знаний и базы данных системы. Предложена методика построения ВДВ, которая включает следующие этапы:

1) формирование требований к ВДВ исходя из задач управления; 2) выделение лимитирующих секций сушильной установки; 3) определение параметров процесса оказывающих влияние на влагосодержание материала в лимитирующих секциях и конечное влагосодержание; 4) сбор статистических данных о значениях влагосодержания материала в лимитирующих секциях, управляющих и возмущающих воздействий; 5) разделение множества данных на обучающее и тестовое подмножества; 6) выбор архитектуры нейронной сети и ее обучение для каждой лимитирующей секции; 7) проверка адекватности полученной нейронной сети; 8) выбор микропроцессорного устройства для реализации ВДВ; 9) разработка программного и алгоритмического обеспечений ВДВ.

Разработка ИУС (рис. 3) производилась в рамках спиральной модели жизненного цикла ИС в соответствии со стандартом ISO/IEC 12207. При проектировании и разработке программного обеспечения ИУС использовались CASE-средства Erwin 4.0 и BPwin 4.0 (Computer Associates), а также RAD-система Borland Delphi 4 (Borland Software Corporation).

Информационно-управляющая система состоит из двух подсистем: измерительной подсистемы, являющейся виртуальным датчиком влагосодержания материала в виде отдельного устройства на основе контроллера Texas Instruments семейства MSP430, осуществляющей мониторинг влагосодержания материала в лимитирующих секциях и управляющей системы, синтезирующей в реальном времени управляющие воздействия, оптимизирующие работу сушильной установки. Ядром измерительной и управляющей подсистем являются базы знаний и базы данных.

Измерительная подсистема включает два основных модуля.

1. Модуль опроса датчиков, который предназначенный для сбора информации об основных параметрах процесса.

2. Модуль расчета влагосодержания материала, где производится нормализация измеренных значений, расчет влагосодержания материала по аналитическим моделям и денормализация полученных значений.



**Рис. 3. Структурная схема ИУС**

2. Модуль логического вывода, предназначенный для определения управляющего воздействия. Логический вывод производится с использованием нечетких множеств и алгоритма Мамдани.

3. Модуль идентификации ситуации, который позволяет идентифицировать текущую ситуацию функционирования сушилки и ее принадлежность к классам ситуаций.

4. Модуль определения меры доверия, где реализуется процедурная модель определения меры доверия к требуемому влагосодержанию на выходе сушилки по значениям влагосодержания материала в лимитирующих секциях и результатам работы экспертов.

Результаты имитации работы информационно-управляющей системы процессами сушки приведены на рис. 4, где показаны значения влагосодержания материала на выходе сушильной установки и производительности процесса сушки без использования информационно-управляющей системы (а) и с ее использованием (б).

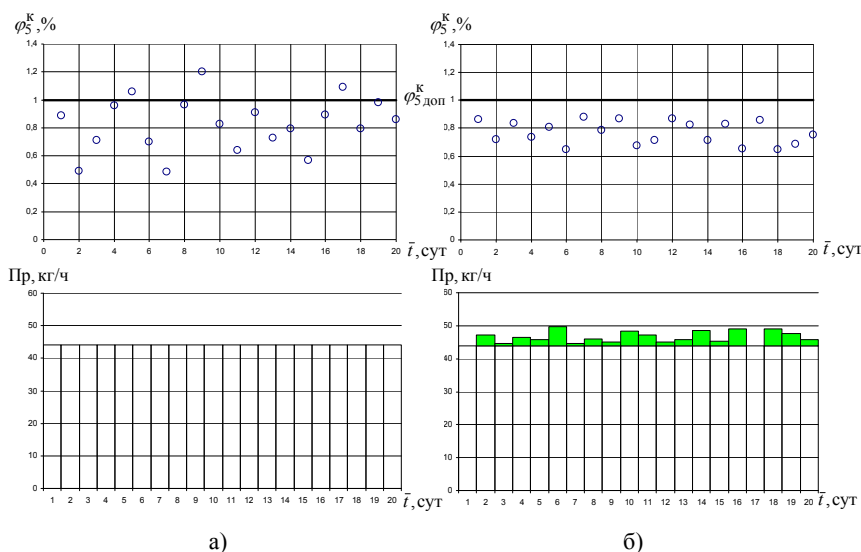


Рис. 4. Результаты работы ИУС

Информационно-управляющая система процессами сушки, использующая виртуальный датчик влагосодержания материала, внедрена на ОАО «Тамбовский завод Октябрь». Ее применение позволило увеличить вероятность выхода качественной продукции до 0,98, а также повысить производительность процесса сушки на 5%.

**В приложения** вынесены таблицы массивов параметров аналитических моделей, данные, используемые при обучении нейронных сетей, текст программы микроконтроллера входящего в состав виртуального датчика, описание технических средств информационно-управляющей системы, авторские свидетельства на программы для ЭВМ, акты внедрения.

**В заключении** приведены основные выводы и результаты работы.

## ВЫВОДЫ

1. Сформулированы общая и частные задачи оптимизации режимов работы сушильной установки, предложен алгоритм управления процессами сушки в многосекционных сушильных установках, учитывающий влияние большого числа возмущающих воздействий, отличающийся от существующих оперативным устранением отклонения влагосодержания материала в различных точках по длине аппарата от допустимых значений с использованием нечеткой логики, обеспечивающий повышение качества выпускаемой продукции и производительности процесса сушки.



2. Разработаны аналитические модели, основанные на нейронных сетях, отличающиеся от существующих определением влагосодержания движущегося материала в различных точках по длине сушильной установки, пригодные для решения задач управления режимами сушки.

3. Разработана процедурная модель для расчета меры доверия к достижению требуемого влагосодержания материала на выходе сушилки по значениям влагосодержания материала в лимитирующих секциях, пригодная для классификации возможных ситуаций в многосекционной сушильной установке и выработки управляющих воздействий, отличающаяся от существующих использованием накопленного опыта экспертов и применением метода Демпстера-Шафера.

4. Создан виртуальный датчик, реализующий бесконтактное определение влагосодержания материала в лимитирующих секциях в процессе сушки.

5. Предложена методика построения виртуальных датчиков влагосодержания материалов в многосекционных сушильных установках на основе нейронных сетей.

6. Разработана ИУС, использующая виртуальный датчик влагосодержания материала, осуществляющая решение задач управления процессами сушки в многосекционной сушильной установке.

## НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Погонин, В.А. Информационно-управляющая система одним классом многомерных объектов / В.А. Погонин, А.Е. Ерышов, И.Я. Муромцева // Вестник Тамб. гос. техн. ун-та.- Тамбов, 2008. – Т.14, №2. – С. 260-263.

2. Ерышов, А.Е. Процедурно-аналитическая модель в системе управления процессом сушки / А.Е. Ерышов // Вестник Тамб. гос. техн. ун-та.- Тамбов, 2008. – Т.14, №3. – С. 602-604.

3. Грибков, А.Н. К вопросу существования решения задачи оптимального управления в ММО-системах / А.Н. Грибков, Р.В. Гребенников, А.Е. Ерышов // Информационные системы и процессы: сб. науч. тр. / Под ред. проф. В.М. Тютюника. – Тамбов; М.; СПб; Баку; Вена: Издательство «Нобелистика», 2007. – Вып.6. – С. 21-22.

4. Артемова, С.В. Виртуальный датчик влажности в системе оптимального управления процессами сушки / С.В. Артемова, А.Н. Грибков, А.Е. Ерышов // Труды Тамб. гос. техн. ун-та. – Тамбов, 2007. – Вып.20. – С. 112-114.

5. Ерышов, А.Е. Применение нейронных сетей для определения относительной влажности красителя. / А.Е. Ерышов, Р.В. Курочкин // Сборник статей магистрантов. – Тамбов: ОАО «Тамбовполиграфиздат», 2007. – Вып.11. – С. 59-63.

6. Артемова, С.В. Расширенный анализ задач оптимального управления / С.В. Артемова, А.Н. Грибков, А.Е. Ерышов, М.А. Артемова // Информационные процессы и управление [Интернет-журнал] – Тамбов: Издательство Тамб. гос. техн. ун-та, 2006. – №1. – С. 2-10. [www.tstu.ru/ipu/2006-1/002.pdf](http://www.tstu.ru/ipu/2006-1/002.pdf)

7. Артемова, С.В. Виртуальный датчик влажности пастообразных красителей на основе нейронной сети / С.В. Артемова, А.Н. Грибков, А.Е. Ерышов, А.М. Каменский // Информационные процессы и управление [Интернет-журнал] – Тамбов: ТГТУ, 2008. – №3. – С. 2-4. [www.tstu.ru/ipu/2008-3/025.pdf](http://www.tstu.ru/ipu/2008-3/025.pdf)

8. Артемова, С.В. Модель динамических режимов многосекционной сушильной установки и ее реализация в системе энергосберегающего управления / С.В. Артемова, А.Н. Грибков, А.Е. Ерышов // Теплофизика в энергосбережении и управлении качеством: материалы 6 международной теплофизической школы. – Тамбов: Издательство ТГТУ, 2007. – С. 144-147.

9. Ерышов, А.Е. Алгоритмическое обеспечение информационно-управляющей системы режимами работы сушильной установки / А.Е. Ерышов // 4-я международная заочная научно-практическая конференция «Глобальный научный потенциал». – Тамбов, 2008. – С. 115-118.

10. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2008611403 от 20 марта 2008г. «Программный модуль информационно-управляющей системы многозонными объектами, обеспечивающий анализ и синтез ресурсосберегающего управления». Авторы: Артемова С.В., Грибков А.Н., Ерышов А.Е., Курочкин Р.В.

11. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2008613480 от 22 июля 2008г. «Программный модуль информационной системы мониторинга влажности материала в многосекционной сушильной установке на основе нейронных сетей». Авторы: Артемова С.В., Грибков А.Н., Ерышов А.Е., Курочкин Р.В.

12. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2008613481 от 22 июля 2008г. «Программный модуль микропроцессорной системы мониторинга влажности материала». Авторы: Артемова С.В., Грибков А.Н., Ерышов А.Е., Курочкин Р.В.

---

Подписано в печать 21.11.2008. Объем 1,0 печ.л. Формат 60х84/16.  
Зак. № 0145. Тираж 100 экз. Бесплатно.  
Типография издательства «Нобелистика» МИНЦ  
**392680, г. Тамбов, ул. Монтажников, 3. Тел.: (4752) 504-600.**