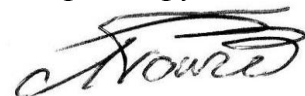


На правах рукописи



ГОНЧАРОВ АНДРЕЙ ВИТАЛЬЕВИЧ

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ТРЕНАЖЕРНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ
ПОДГОТОВКИ ТЕХНОЛОГОВ ПО ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ
СЫПУЧИХ ПРОДУКТОВ**

Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами (образование)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2012

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского», на кафедре «Промышленная автоматика».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Солдатов Виктор Владимирович

Официальные оппоненты: **Учеваткин Александр Иванович**
доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник ГНУ
«Всероссийский научно-исследовательский
институт электрификации сельского
хозяйства»

Мухин Виктор Степанович
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Автоматизированные
системы управления тепловыми процессами»
ФГБОУ ВПО «Национальный
исследовательский университет МЭИ»

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Московский государственный
агроинженерный университет им. В.П.
Горячкина»

Защита состоится «22» мая 2012 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета ДМ 008.004.02 при ФГНУ «Институт информатизации образования» РАО по адресу: 119121, г. Москва, ул. Погодинская, д. 8.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке при ФГНУ «Институт информатизации образования» РАО.

Автореферат разослан по адресу <http://vak2.ed.gov.ru> и размещен на сайте <http://www.iiorao.ru> «21» апреля 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета



О.А. Козлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Непрерывное совершенствование и развитие информационных и коммуникационных технологий (ИКТ), их интеграция в сферу образования, а также возрастающие требования к качеству подготовки технологов инициирует разработку автоматизированных тренажерных комплексов (АТК) как элемента технологического процесса подготовки технологов.

Для существующего состояния промышленности, в том числе пищевой, характерен достаточно высокий уровень сложности и неопределенности технологических процессов. Это требует совершенствования процесса обучения технологов, которые должны быть высококвалифицированными профессионалами в области оптимальной настройки современных контроллеров, управляющих технологическим процессом. АТК позволяет моделировать реальные технологические процессы пищевых производств, с учетом образовательных задач оперативно создавать виртуальные установки и создают возможность обучающимся приобрести необходимые знания и навыки в условиях достаточно ограниченного времени на их подготовку. В современных тренажерах и в программах подготовки и обучения, на них основанных, закладываются принципы развития практических навыков с одновременной теоретической подготовкой.

Для современного состояния развития технических средств подготовки характерен большой интерес к различным аспектам разработки и использования, прежде всего, тренажерных технологий, основанных на персональных компьютерах, массовых операционных системах семейства Microsoft Windows и имитирующих реальные процессы на основе компьютерных моделей. Указанная тенденция является закономерным следствием общего процесса информатизации образования, под которым принято понимать процесс обеспечения сферы образования методологией, технологией и практикой разработки и рационального использования средств информационных и коммуникационных технологий. Отечественный опыт исследований Роберт И.В., Кравцовой А.Ю., Кузнецова А.А., Мартиросян Л.П. и других авторов показывает целесообразность расширения сферы применения средств информационных и коммуникационных технологий в образовательном процессе.

Среди последних работ, посвященных исследованию в области разработки технических средств моделирования, труды Алексеева В.В., Арсеньева Г.Н., Корниенко Л.Г.; исследованию различных аспектов разработки и применения ТК посвящены диссертации Безродного Б.Ф., Годова А.А., Данилюка С.Г., Дя А.Э., Новикова В.Н., Стефановского Д.В. и др.

Несмотря на активные научные исследования в области создания

научных основ разработки АТК, пока еще не сложился единый подход к определению требований к техническим средствам моделирования, оптимальному их построению и применению с использованием возможностей средств информационных и коммуникационных технологий.

Поэтому при решении задачи по разработке АТК целесообразно исходить из специфики профессиональных компетенций технолога, ориентируясь на обобщенный опыт разработки технических средств обучения.

Действительно, существующая система высшего технического образования испытывает серьезные трудности, обусловленные быстрым устареванием полученных знаний, узкой специализацией образования, повышением стоимости образования и др.

В виду наличия различного вида неопределённостей, которые приходится учитывать технологам при решении поставленных перед ними задач, целесообразно прививать им профессиональные компетенции, представленные в соответствующих федеральных образовательных стандартах, овладение которыми позволяет успешно решать задачи, определяющие профессиональную деятельность.

Выбор математического и алгоритмического обеспечения АТК, реализующего методы робастного управления, обусловлен тем, что оно позволяет решать сложные задачи автоматизации современных производств при весьма ограниченном объеме исходной информации о факторах, влияющих на качество управления, например, статистических характеристиках возмущающих воздействий, а также погрешностей параметров математических моделей динамики управляемых объектов. Поэтому использование методов робастного управления позволяет обучить технологов методам решения «открытых задач», т.е. задач, характеризующихся заведомой неточностью и расплывчатостью постановки, и допускающих многовариантность решения. Специфика конкретного технологического процесса определяет особенности реализации автоматизированного тренажерного комплекса. При этом всем технологическим процессам по термической обработке сыпучих продуктов присуща высокая степень неопределенности и многовариантность протекания. С учетом этих факторов в качестве основы для проведения научного исследования и практического применения его результатов в диссертационной работе была определена подготовка технологов по управлению процессом обжарки сыпучих продуктов.

Таким образом, **актуальность темы** диссертационного исследования обусловлена необходимостью разработки автоматизированного тренажерного комплекса для подготовки технологов пищевых производств, и в частности технологов по термической обработке сыпучих продуктов в вузах и предприятиях пищевой промышленности,

реализующих технологию решения «открытых задач» на основе методов робастного управления.

Объектом исследования является автоматизированный тренажерный комплекс как элемент технологического процесса подготовки технологов по термической обработке сыпучих продуктов.

Предметом исследования являются научные основы, модели и методы управления, реализующие технологию решения «открытых задач» на основе методов робастного управления и обеспечивающие функционирование автоматизированного тренажерного комплекса для подготовки технологов пищевой промышленности.

Целью исследования является повышение эффективности процесса формирования профессиональных компетенций технологов по термической обработке сыпучих продуктов.

Таким образом, **научной задачей**, решаемой в настоящей диссертационной работе, является разработка математического и алгоритмического обеспечения, а также разработка автоматизированного тренажерного комплекса для подготовки технологов по решению задач рациональной организации технологических процессов по термической обработке сыпучих продуктов, обеспечивающей развитие профессиональных навыков управления этими процессами.

Задачи исследования. Достижение поставленной выше цели исследования и научной задачи может быть обеспечено путем решения следующих задач:

1. Разработать математическую модель функционирования автоматизированного тренажерного комплекса для подготовки технологов по термической обработке сыпучих продуктов, описывающую динамику влажности зерен сыпучих продуктов при их обжарке и влияние управляющих воздействий на температуру воздушной среды ростера.
2. Разработать алгоритм функционирования автоматизированного тренажерного комплекса для подготовки технологов по термической обработке сыпучих продуктов, реализующий технологию решения «открытых задач» на основе методов робастного управления.
3. Разработать автоматизированный тренажерный комплекс для подготовки технологов к решению задач по рациональной организации технологических процессов по термической обработке сыпучих продуктов, обеспечивающий развитие профессиональных навыков управления этими процессами.

Научная новизна и теоретическая значимость диссертационной работы состоит в том, что в ней:

1. Разработана математическая модель расчета начальных параметров обжарки сыпучих продуктов, предназначенная для использования в автоматизированном тренажерном комплексе и позволяющая по виду

- сыпучего продукта (кофе, орехи, семечки и т.д.), его начальной влажности и выбранной обучаемым температуры обжарки, прогнозировать начальную продолжительность обжарки зерен;
2. Разработан алгоритм функционирования автоматизированного тренажерного комплекса для подготовки технологов по термической обработке сыпучих продуктов, реализующий технологию решения «открытых задач» на основе методов робастного управления и позволяющий выявлять и устранять ошибки, допускаясь ими (технологами) при определении начальных параметров обжарки сыпучих продуктов и их корректировки в ходе обжарки;
 3. Разработан автоматизированный тренажерный комплекс, который позволяет значительно ускорить подготовку технологов в области термической обработки сыпучих продуктов и повысить качество их обучения, благодаря использованию методов решения «открытых задач».

Практическая значимость результатов работы определяется тем, что в ней:

- разработан автоматизированный тренажерный комплекс, применение которого позволяет исследовать закономерности рациональной организации технологического процесса обжарки сыпучих продуктов при различных исходных условиях, а также осуществлять процесс обучения методам решения «открытых задач»;

- разработаны и использованы при выполнении на автоматизированном тренажерном комплексе лабораторных работ по управлению качеством обжарки сыпучих продуктов, следующие математические модели: модель зависимости продолжительности обжарки сыпучего продукта от первоначальной и конечной влажности зерен; модель теплообменных процессов в ростере в виде обыкновенного дифференциального уравнения и передаточной функции канала управления температурой горячего воздуха;

- разработано техническое устройство, обеспечивающее оперативное измерение влажности сыпучих продуктов после завершения процесса их обжарки, на которое получен патент.

На защиту выносятся следующие научные результаты:

1. Математическая модель расчета начальных параметров обжарки сыпучих продуктов, предназначенная для использования в АТК и позволяющая по виду сыпучего продукта, его начальной влажности и выбранной обучаемым температуре обжарки, прогнозировать начальную продолжительность обжарки зерен;
2. Алгоритм функционирования автоматизированного тренажерного комплекса для подготовки технологов по термической обработке сыпучих продуктов, реализующий технологию решения «открытых задач» на основе методов робастного управления и позволяющий

выявлять и устранять ошибки, допущенные технологами при определении начальных параметров обжарки сыпучих продуктов и их корректировки в процессе обжарки;

3. Автоматизированный тренажерный комплекс, который позволяет значительно ускорить подготовку технологов в области термической обработки сыпучих продуктов и повысить качество их обучения, благодаря использованию методов решения «открытых задач».

Достоверность результатов, полученных в диссертационной работе, подтверждается обоснованным выбором исходных данных, корректным использованием математического аппарата, теории автоматического управления, непротиворечивостью результатов диссертации данным, полученным другими авторами, положительным опытом использования разработанного АТК в учебных процессах в ГОУ ВПО «Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского» (МГУТУ им. К.Г. Разумовского) и в ФГОУ ВПО «Российский государственный аграрный заочный университет» (РГАЗУ).

Апробация работы. Основные положения и результаты исследований по теме диссертации доложены, обсуждены и одобрены на: XI Международной научно-практической конференции «Стратегия развития пищевой промышленности», 2005 г., г. Москва; Международной конференции «Системные проблемы надежности, качества, информационных и электронных технологий (Инноватика-2006)», г. Сочи, 2006 год; научно-практических конференциях Российского государственного аграрного заочного университета (РГАЗУ) в г. Балашиха, Московская обл., 2008-2009 гг.; научно-методических семинарах кафедр «Информационно-управляющие системы» (МГАУ) в 2010-2011 гг., «Промышленная автоматика» (МГУТУ им. К.Г. Разумовского) в 2008-2011 гг.

Реализация результатов исследований. Результаты диссертации реализованы в учебных процессах кафедр «Электрооборудования и автоматики» Российского государственного аграрного заочного университета (ФГОУ ВПО РГАЗУ) в г. Балашиха, Московская обл.; «Промышленная автоматика» Московского государственного университета технологий и управления им. К.Г. Разумовского (ФГБОУ ВПО МГУТУ) и в филиалах ФГБОУ ВПО МГУТУ в г. Липецк; ФГБОУ ВПО МГУТУ в г. Абдулино Оренбургской области, а также при обучении персонала, работающего на предприятиях пищевой промышленности транснациональной компании ЗАО «Schneider Electric».

На техническое решение по измерению уровня жидкости в сыпучих продуктах в процессе обжарки получен патент на устройство.

Исследования были выполнены в соответствии с аналитической ведомственной целевой программой Министерства образования и науки

РФ «Развитие научного потенциала высшей школы», проект №5903 «Разработка адаптивных и робастных систем управления технологическими процессами с нестационарными параметрами на основе мультисканального бесконтактного мониторинга».

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 3 глав, общих выводов, списка литературы и приложения. Она изложена на 135 страницах, включая 35 рисунков и список литературы из 166 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность решаемой проблемы, изложено краткое содержание глав диссертации, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен анализ организации подготовки технологов пищевой промышленности. При этом установлены требования, предъявляемые к подготовке технолога (специалиста) пищевой промышленности и указана существующая важная проблема повышения интенсивности и эффективности подготовки этих специалистов методами и техническим средствам, используемых в современных автоматизированных производствах пищевой промышленности. Рассмотрен способ решения данной проблемы с использованием автоматизированных обучающих систем, одним из самых передовых и эффективных компонентов которых являются АТК.

Выполнен анализ состояния и способов использования тренажерных технологий при подготовке технологов.

При этом установлены особенности управления познавательной деятельностью технологов, выявлена специфика автоматизированных обучающих систем. Установлено, что при подготовке технологов пищевого производства, в частности инженеров-технологов по обжарке сыпучих продуктов, тренажерные технологии используются явно недостаточно. Это обусловлено недостаточной проработкой научно-методических аспектов формализации, идентификации и управления технологическими процессами пищевого производства до уровня, обеспечивающего возможность реализации в форме АТК для подготовки специалистов технологов. Следует сделать вывод о несоответствии состояния организации подготовки технологов по термической обработке сыпучих продуктов современным требованиям к качеству образовательного процесса. Кроме того, недостаточно активно применяются специализированные методы управления технологическими процессами пищевых производств, базирующиеся на адекватных математических моделях и методах управления, учитывающих уровень неполноты информации о статистических характеристиках возмущающих воздействий и динамических характеристик управляемых объектов.

На основе функционально-информационной структуры

технологического процесса обжарки сыпучих продуктов в специальных обжарочных машинах (ростерах) как элемента предметной области выявлены его особенности.

Обоснована необходимость использования многоступенчатой схемы управления интенсивностью обжарки. Показано, что эффективность применения многоступенчатой схемы обжарки значительно повышается при использовании робастных методов управления, позволяющих учесть эту особенность управляемого объекта. Кроме того, дополнительным преимуществом метода робастного управления обжаркой сыпучих продуктов является возможность его быстрого применения в промышленной эксплуатации, т.к. для этого не требуется достаточно точная информация о динамике управляемого объекта и статистических характеристиках действующих на него возмущений.

Установлены место и роль процесса управления и поддержки принятия решений при реализации технологического процесса обжарки сыпучих продуктов. При этом указано, что одной из наиболее перспективных форм организации процесса управления технологическими объектами является интерактивный метод принятия соответствующих решений на основе интеллектуально-информационной базы, предусматривающий возможность привлечения методов искусственного интеллекта и позволяющий гибко сочетать вычислительные возможности ЭВМ и интеллектуальные возможности специалистов наиболее оптимальным способом, что, в конечном счете, позволяет добиваться высокого качества обучения.

На рис. 1 представлена укрупненная блок - схема алгоритма управления типовым технологическим процессом обжарки сыпучих продуктов, к которым относятся: арахис, фундук, миндаль, фисташки, семена подсолнечника (семечки), зерна кофе, бобы какао, сои и т.д.

Для каждого из сыпучих продуктов перед обжаркой необходимо задать ее параметры с целью конкретизации управляемого технологического процесса.

При этом программное обеспечение АТК автоматически анализирует правильность установки технологами требуемых параметров обжарки и выполняет подробный анализ допущенных ими ошибок.

В случае оценки правильности установленных параметров в результате лабораторного химического анализа определяются показатели качества обжарки сыпучих продуктов. Например, при обжарке зерен кофе качество определяется значениями таких параметров, как кислотность и геометрический размер.

Расчет оптимальных параметров обжарки выполняется с

использованием методов робастного управления, иллюстрирующих методологию решения «открытых задач». При этом используется метод настройки типовых промышленных регуляторов на основе метода вспомогательной функции, разработанного профессором А.В. Шавровым, доработанного в диссертации для случая дискретных цифровых систем.

С целью приобретения опыта органолептического анализа качества сыпучих продуктов технологи подтверждают свои выводы на основе тестового контроля за усвоением допущенных ими ошибок.

В тех случаях, когда технологами были неправильно выбраны параметры обжарки, после разбора допущенных ошибок выбираются требуемые технологией параметры (время и температура обжарки), после чего выполняется замена основной порции сыпучего продукта на резервную и процесс повторяется с начальной стадии.

В результате появляется возможность для больших групп технологов обеспечить высокое качество обучения при минимальном объеме занятий и привлечении небольшого количества преподавателей, что способствует сокращению затрат на процесс обучения и повышению его качества, благодаря возможности изучения специалистами технологами современных высокоэффективных методов управления и возможности оперативного получения индивидуальных консультаций по решению поставленной задачи.

Вторая глава посвящена анализу и разработке методов робастного управления технологическими процессами по термической обработке сыпучих продуктов. При этом рассмотрена задача обоснованного выбора критериев управления и используемых при их оптимизации ограничений. Установлено также требование к параметрам настройки регуляторов, при выполнении которого, обеспечивается робастность систем управления. Это требование представимо в следующем виде:

$$\alpha_0 \rightarrow \max,$$

где α_0 – свободный член характеристического уравнения замкнутой системы $\sum_{k=0}^n a_k s^k = 0$ $\sum_{k=0}^n \alpha_k * s^k = 0$; n – положительное целое число, α_k - коэффициент характеристического уравнения, s – неизвестная комплексная величина.

Выполнен анализ тех из существующих методов робастного управления, которые нашли наибольшее практическое применение. В результате установлено, что среди них наибольшей эффективностью обладает метод на основе дискретной вспомогательной функции, разработанной в диссертации. На рис. 2 представлены графики переходных

процессов систем управления, параметры настройки регуляторов которых рассчитаны согласно методам профессоров Ротача В.Я. и по методу, основанному на использовании дискретной вспомогательной функции. Из рис. 2 видно основное различие между полученными частотными характеристиками заключается в смещении в высокочастотный диапазон амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) замкнутой системы, параметры настройки регулятора которой рассчитаны по методу В.Я. Ротача. Это приводит к излишнему затягиванию переходных процессов в системе, что не присуще системам, параметры настройки регуляторов которых, определяются с использованием дискретной вспомогательной функции.

Однако методу вспомогательной функции присущи и недостатки, например, сравнительно узкая область применимости, что позволяет его использовать лишь при настройке систем с типовыми регуляторами.

Построена математическая модель зависимости влажности сыпучих продуктов от продолжительности их обжарки, выраженная следующей формулой:

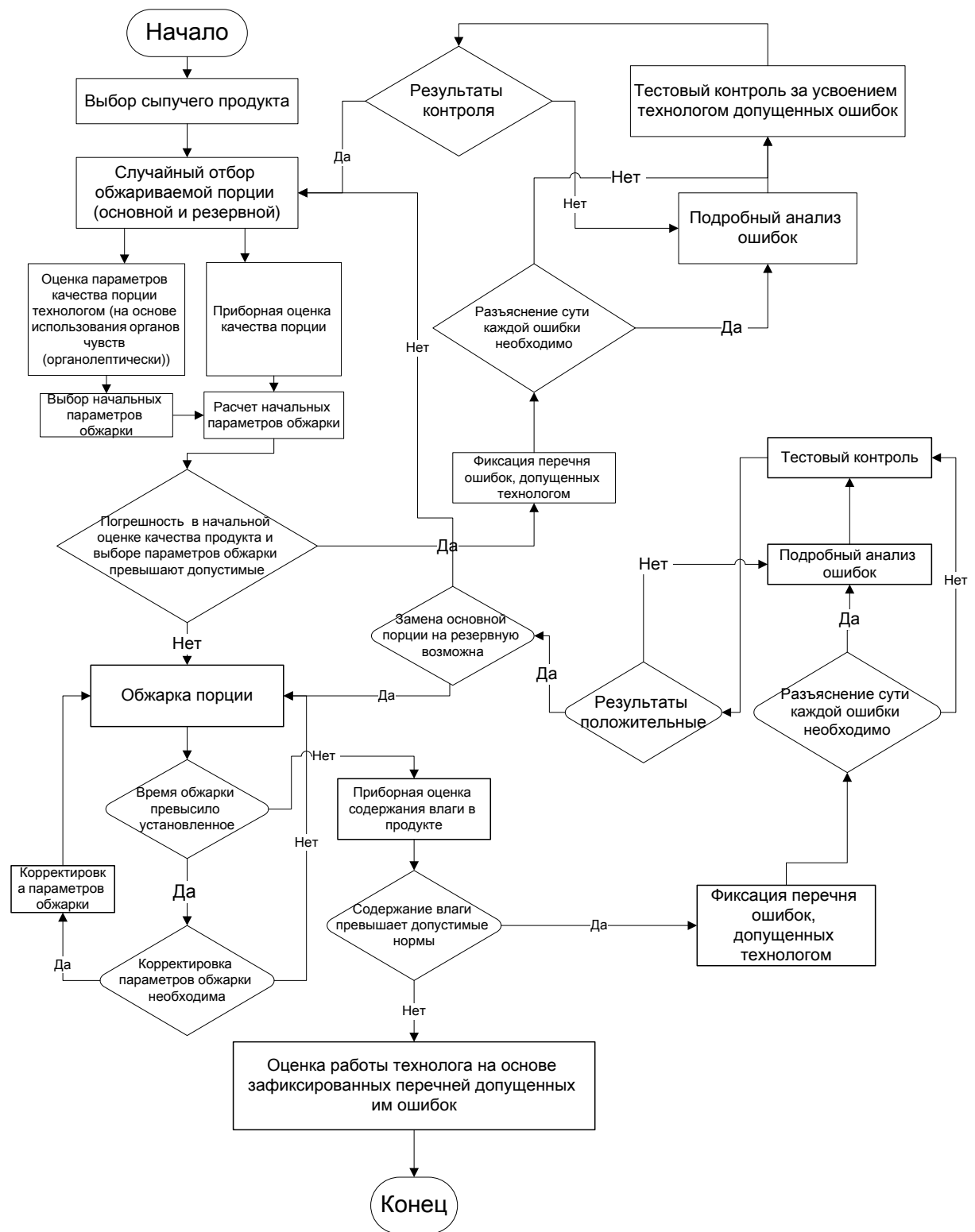


Рис.1. Укрупненная блок – схема алгоритма технологического процесса обжарки сыпучих продуктов на основе робастного метода управления.

$$\theta(t) = \theta_0 \exp\left(-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau\right),$$

где $\theta(t)$ – зависимость равновесной относительной влажности от времени

t ; θ_0 – начальное значение $\theta(t)$ при $t = 0$; в подавляющем большинстве современных термосистем $\lambda(\tau) = \text{const}$ и имеет размерность c^{-1} . С ее помощью можно для каждой конкретной партии сыпучих продуктов дополнительно уточнить интервал времени $T_{об}$, необходимый для достижения заданной влажности сыпучих продуктов при выбранной температуре его обжарки.

$$T_{об} = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{\theta_{зд}}{\theta_0} \right),$$

где $\theta_{зд}$ – заданное значение влажности партии сыпучих продуктов.

Данная модель не учитывает, например, размер зерен, который случаен, а также влажность каждого зерна, которая также случайна. Поэтому расчеты, выполненные с использованием данной модели имеют определённую погрешность в определении продолжительности обжарки.

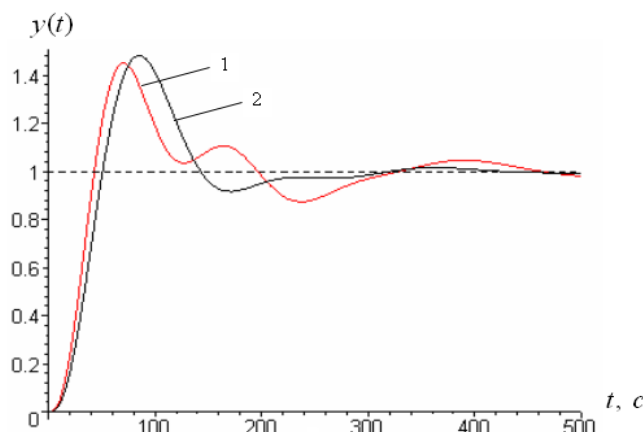


Рис. 2. Переходные процессы на выходе системы: 1 – метод Ротача В.Я.; 2 – метод дискретной вспомогательной функции (предложенный диссертантом)

Математическая модель динамики теплообменных процессов в ростере представлена обыкновенным дифференциальным уравнением с запаздывающим аргументом

$$T^* \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = ku(t - \tau) + \beta(t), \quad (1)$$

$$T^* = VgC + V_{вблх} \rho c + \alpha; \quad k = V_{вх} \rho c; \quad \beta(t) = \alpha y_H(t).$$

где ρ и c – соответственно плотность и удельная теплоемкость воздуха; $V_{вх}$ и $V_{вблх}$ – объемы воздуха, входящего и выходящего из ростера; V – объем ростера; g и C – плотность и удельная теплоемкость внутренней среды ростера; α – коэффициент теплоотдачи; $y_H(t)$ – температура наружного воздуха, τ – постоянная времени транспортного запаздывания,

причем постоянная времени T^* , коэффициент передачи k и возмущающее воздействие $\beta(t)$ задаются следующими выражениями:

При переходе к дискретному представлению уравнение (1) принимает вид

$$\left(2\frac{T^*}{T} + 1\right)y(hT) + \left(1 - 2\frac{T^*}{T}\right)y[(h-1)T] = ku[(h-n)T] + +ku[(h-n-1)T] + \beta(hT) + \beta[(h-1)T] \quad (2)$$

где h – целое положительное число; T – период квантования; n – целое положительное число, причем $n = \tau / T$.

Применив z – преобразование к уравнению (2), получим дискретную передаточную функцию объекта для канала управления температурой

$$W_{об}(z) = \frac{k(z+1)z^{-n}}{\left(2\frac{T^*}{T} + 1\right)z + \left(1 - 2\frac{T^*}{T}\right)}, \quad (3)$$

где z – комплексная переменная.

В результате выполненной идентификации объекта, были установлены численные значения параметров k , T и n дискретной передаточной функции (3).

Передаточная функция (3) использовалась для определения оптимальных значений параметров настройки робастной системы управления температурой обжарки сыпучих продуктов с дискретными ПИД и ПИ регуляторами, получившими наибольшее применение в пищевой промышленности.

Дискретные передаточные функции данных регуляторов представим в следующем виде:

$$W_{ПИД}(z) = K_p \frac{T_D}{T} \left(\frac{z-1}{z}\right) + K_p + K_p \frac{T}{T_I} \left(\frac{z}{z-1}\right); \quad (4)$$

$$W_{ПИ}(z) = K_p + K_p \frac{T}{T_I} \left(\frac{z}{z-1}\right), \quad (5)$$

где K_p – коэффициент передачи регулятора; T_D и T_I – постоянные времени дифференцирования и интегрирования соответственно.

Для расчета значений параметров настройки системы управления температурой обжарки сыпучих продуктов был использован метод вспомогательной функции, модифицированной для дискретных систем, в которых при управлении технологическими процессами используются цифровые микропроцессорные контроллеры.

В случае дискретных систем с ПИД регуляторами для вспомогательной функции получено следующее выражение:

$$F_{ПИД}^{ec}(\omega) = \frac{K_p}{T_I} = \frac{2M \operatorname{tg}\left(\frac{T\omega}{2}\right)}{T(M^2 - 1)A} \left[M \cos \gamma + 2\frac{T_D}{T} \operatorname{tg}\left(\frac{T\omega}{2}\right) M \sin \gamma - \sqrt{1 - 4\frac{T_D^2}{T^2} \operatorname{tg}^2\left(\frac{T\omega}{2}\right)} \right] \quad (6)$$

где M – заданное значение показателя колебательности системы; ω – циклическая частота, а величины γ и A определяются выражениями

$$A = A(\omega) = |W_{об}(e^{i\omega T})|; \gamma = \gamma(\omega) = -\frac{\pi}{2} - \arg W_{об}(e^{i\omega T}).$$

Для достижения робастности системы при заданном значении T_D определяется такое значение $\omega = \omega_p$, при котором выполняется требование

$$\frac{K_p}{T_I} \rightarrow \max, \quad (7)$$

где ω_p – резонансная частота системы.

Значение T_D также выбирается так, чтобы при ограничении

$$|W_{3C}(e^{i\omega_p T})| \leq M, \quad (8)$$

обеспечить выполнение требования

$$T_D \rightarrow \max, \quad (9)$$

где $|W_{3C}(e^{i\omega_p T})|$ – амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) замкнутой системы.

После нахождения таких значений T_D и ω_p , для которых выполняются требования (7) – (9), значение параметра K_p при $\omega = \omega_p$ определим, используя следующее выражение:

$$K_p = \frac{M^2 \sin \gamma}{A(M^2 - 1)} \left[1 - \frac{2T_D \operatorname{tg} \left(\frac{T\omega}{2} \right)}{TM \sin \gamma \sqrt{1 + 4 \frac{T_D^2}{T^2} \operatorname{tg}^2 \left(\frac{T\omega}{2} \right)}} \right]. \quad (10)$$

Таким образом, модифицированный для дискретных систем метод вспомогательной функции позволяет определить такие значения параметров настройки дискретного ПИД регулятора K_p , T_I и T_D , при которых обеспечивается выполнение условия робастности (7).

Поскольку согласно выражениям (4) и (5) при выполнении равенства

$$T_D = 0, \quad (11)$$

имеет место следующее соотношение: $W_{ПИ}(z) = W_{ПИД}(z)$,

то выражение для вспомогательной функции, предназначенной для расчета настроек дискретных систем с ПИ регуляторами, можно получить, подставив в выражения (6) и (10) значение T_D , заданное равенством (11).

В результате имеем

$$F_{III}^{ec}(\omega) = \frac{K_p}{T_H} = \frac{2M \operatorname{tg}\left(\frac{T\omega}{2}\right)}{T(M^2 - 1)A} (M \cos \gamma - 1); K_p = \frac{M^2}{(M^2 - 1)A} \sin \gamma. \quad (12)$$

По формулам (1) – (12) производится расчет параметров робастной настройки регуляторов, используемых при управлении температурным режимом обжарки.

В третьей главе, основываясь на ранее полученных результатах, был разработан АТК для подготовки специалистов решению задач по рациональной организации технологических процессов по термической обработке сыпучих продуктов, обеспечивающий развитие профессиональных навыков и углубление теоретических знаний о закономерностях их протекания.

В состав технических средств управления АТК для подготовки технологов входит ПЛК Modicon TSX Micro.

В качестве датчиков температуры в АТК выбраны два термометра сопротивления ТПТУ-3, предназначенные для измерения температуры воздуха в управляемом объекте и внешней среды.

Для оперативного измерения влажности сыпучих продуктов в диссертации разработано запатентованное техническое устройство, обеспечивающее существенное сокращение времени на проведение соответствующих экспериментов. Оно используется в АТК при оценке содержания влаги в сыпучем продукте после его обжарки.

Для вывода текстовых и графических сообщений, а также для диагностики, управления и настройки устройств системы управления, применяется панель визуализации информации Magelis, которая очень удобна и проста в использовании, обладает значительно уменьшенным размером.

Для программной реализации алгоритмов робастного управления используется SCADA-система TRACE MODE, позволяющая осуществлять разработку распределенной АСУТП как единого проекта, причем модификация переменной на одном узле ведет к автоматическому обновлению на другом узле. Кроме того, реализованным на базе данной системы проектом легко управлять, а АСУТП легко обслуживать.

В качестве физической модели управляемого технологического объекта используется машина «ростер», которая ныне широко применяется предприятиями пищевой промышленности для обжарки сыпучих продуктов.

Для обеспечения возможности исследования характеристик технологического процесса индивидуальной обжарки сыпучих продуктов и обучения решению «открытых задач» разработано рабочее место технолога.

Применение АТК позволяет исследовать закономерности физико-химических процессов в ростере при обжарке сыпучих продуктов и

возможность управления ими. Используя АТК можно получить информацию о ходе обжарки сыпучих продуктов и редактировать калибровочные таблицы контроллера в графическом виде.

Программное обеспечение АТК осуществляет отображение и запись в режиме реального времени измерительной и управляющей информации, с возможностью сохранения ее в цифровом и графическом виде для последующего подробного анализа технологического процесса и правильности управляющих воздействий по его реализации.

Разработанный АТК при небольшой модификации программного обеспечения, связанный с реализацией новых математических моделей объектов, может использоваться в различных отраслях пищевой промышленности и сельскохозяйственного производства, например, в овощеводстве защищенного грунта, животноводстве, птицеводстве и других.

Часть разработанной конструкции АТК стала основой для создания других тренажеров, таких как: автоматизированная система управления комплексом по разведению рыб; автоматизированная система управления дезинтегратором; стенд тепловых испытаний, используемых для обучения специалистов по направлению подготовки «Автоматизация технологических процессов и производств».

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. В результате проведенного анализа была установлена необходимость разработки АТК, предназначенного для подготовки технологов в области термической обработки сыпучих продуктов. Разработана математическая модель расчета начальных параметров обжарки сыпучих продуктов, которая позволяет, основываясь на исходных данных о типе сыпучего продукта, его начальной влажности и выбранной обучаемым температуре обжарки, прогнозировать начальную продолжительность процесса термической обработки зерен. В основу модели положены уравнение динамики теплообменного процесса в ростере, уравнение зависимости влажности сыпучего продукта от продолжительности обжарки, передаточные функции регуляторов при управлении температурным режимом обжарки и др. Разработанная модель не учитывает, что обжариваемые зерна различаются по размерам и по начальной влажности, поэтому начальное время обжарки определяется с некоторой погрешностью. Данная модель создает необходимые предпосылки для разработки алгоритма функционирования тренажерного комплекса.

2. Разработан алгоритм функционирования АТК для подготовки технологов по термической обработке сыпучих продуктов. В качестве входной информации в нем используется две группы данных. Первая группа – это данные о типе и начальном состоянии обрабатываемого сыпучего продукта и о параметрах его обжарки, задаваемых обучаемым до

начала термической обработки. Вторая группа данных – это данные о корректировках параметров обжарки, производимых обучаемым в процессе термической обработки и данные автоматизированного измерения содержания влаги в продукте по завершению процесса его обжарки. Алгоритм позволяет определить, основываясь на первой группе данных, предполагаемую продолжительность обжарки сыпучего продукта, основываясь на которой, можно выявить грубые ошибки, допущенные обучаемым при определении начальных параметров обжарки. Алгоритм также позволяет определить, основываясь на первой и второй группах данных, соответствует ли конечная влажность обжаренного продукта допустимой. В случае несоответствия конечной влажности обжаренного продукта допустимой, определяется характер допущенных обучаемым ошибок и их причины.

В случае выявления данных ошибок в алгоритме предусмотрена возможность информирования обучаемого об их сути. Качество усвоения материала проверяется тестовым автоматизированным контролем. Данный алгоритм был реализован при разработке АТК.

3. Разработан АТК, который позволяет значительно ускорить подготовку технологов в области термической обработки сыпучих продуктов и повысить качество их обучения. В разработанном АТК в качестве основного программного обеспечения используется стандартная операционная система и стандартный SCADA - пакет. Помимо штатного программного обеспечения, в составе комплекса используется специально разработанная модель зависимости влажности зерен сыпучего продукта от температуры и времени обжарки и модель динамики теплообменных процессов в обжарочной машине. Добавленные в штатное программное обеспечение функции работы с моделями позволяют в рамках занятий в учебном классе имитировать и проигрывать различные ситуации управления теплообменными процессами. К отличительным особенностям разработанного АТК относятся: применение модульного подхода, простота настройки, возможность использования в виде мобильного комплекса, удобность эксплуатации, возможность выполнять оперативные измерения влажности продукта, защищенного патентом.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Материалы исследования нашли отражение в следующих публикациях автора:

В ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК МОН РФ:

1. Гончаров А.В., Хисамов Р.Н. Лабораторный мультимедийный стенд для обучения студентов методам построения АСУТП // Информатизация образования и науки. - 2010. - №3 (7).– С. 107-118.

2. Гончаров А.В., Хисамов Р.Н. Обучение студентов решению «открытых задач» на основе парадигм управления // Вестник Российской академии образования. - 2010. №2 (50). – С. 45-47.
3. Гончаров А.В., Солдатов В.В., Юдин А.А. Оптимизация линейных робастных систем // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. - 2006. - № 8. – С. 11 – 13.
4. Гончаров А.В., Солдатов В.В. Идентификация нелинейных систем с использованием нечеткого логического вывода // Вестник ФГОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». Агроинженерия. - 2008. - №3(28). – С. 76 – 80.
5. Гончаров А.В., Солдатов В.В. Математическое моделирование и оптимизация теплообменников // Вестник ФГОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». Агроинженерия. Научный журнал. – 2008. - №3(28). – С. 53 – 56.
6. Гончаров А.В. Метод вспомогательной функции для цифровых систем управления. // Технологии XXI века в легкой промышленности. - 2012. - № 2.

Монография:

7. Гончаров А.В., Солдатов В.В. Применение парадигм интеллектуального управления при решении «открытых задач» автоматизации. – М.: Пробел-2000, 2010. – 360 с.

Публикации в других изданиях:

8. Гончаров А.В., Солдатов В.В. Методы робастного управления обжаркой сыпучих продуктов // Системные проблемы надежности, качества информационных и электронных технологий в инновационных проектах (Инноватика 2006) // Материалы Международной конференции и Российской научной школы. Часть 4. Том I. – М.: Радио и связь, 2006. – С. 299 – 301.
9. Гончаров А.В. Идентификация систем управления обжаркой сыпучих продуктов на основе нечеткого логического вывода // Труды XI Международной научно-практической конференции «Стратегия развития пищевой промышленности», 2 – 3 ноября 2005 г., выпуск 10, том 3. – М.: МГУТУ, 2005. – С. 117 – 121.
10. Гончаров А.В., Солдатов В.В. Математическое моделирование процесса обжарки сыпучих продуктов // Вестник Российского государственного аграрного заочного университета. Научный журнал № 1 (6). – М.: РГАЗУ, 2006. – С. 224 – 226.
11. Солдатов В.В., Гончаров А.В. Выбор значения показателя колебательности при оптимизации систем в условиях статистической неопределенности // Вестник Российского государственного аграрного заочного университета. Научный журнал № 1 (6). – М.: РГАЗУ, 2006. – С. 226 – 227.

Патент на изобретение:

12.Гончаров А.В и др. Устройство для измерения уровня жидкости//
Решение о выдаче патента РФ на изобретение по заявке №
2010109482/28 (013321) от 12.03.2010. 2011.