

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

УДК 681.518.5

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ТЕРМООБРАБОТКИ КАКАО-БОБОВ С ПОМОЩЬЮ АЛГОРИТМА С ПРОГНОЗИРУЮЩИМИ МОДЕЛЯМИ

К.Б. ФАМ¹, аспирант, П.М. МУРАШЕВ¹, аспирант,
В.Н. БОГАТИКОВ¹, д-р техн. наук, С.М. КИЕУ², магистр

¹Тверской государственной технической университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: phambang79520897405@gmail.com

²Военная академия воздушно-космической обороны
им. Маршала Советского Союза Г.К. Жукова
170022, Тверь, ул. Жигарева, 50

© Фам К.Б., Мурашев П.М., Богатиков В.Н., Киеу С.М., 2024

В статье описано проектирование и моделирование автоматизированной системы управления (АСУ) на основе алгоритма УПМ-регулятора для управления термической обработкой какао-бобов в ленточной конвейерной сушилке. Процессы термической обработки моделируются как непрерывная, пространственно распределенная система с одним входом и одним выходом, где регулируемой переменной является температура входящего сушильного воздуха, а контролируемой переменной – температура продукта в сушильной камере. Представлены и обсуждены требования к программному и аппаратному обеспечению АСУ. Численное моделирование АСУ проводилось с использованием пакета прикладных программ Matlab. Приведены результаты численного моделирования, подтверждающие, что УПМ-регулятор стабилен и устойчив по отношению к входным помехам. Показано, что система обеспечивает быструю реакцию на смещение и устранение установившейся ошибки в процессе термической обработки.

Ключевые слова: УПМ-регулятор, термическая обработка, какао, автоматизированный контроль, стратегия контроля, математическое моделирование.

DOI: 10.46573/2658-5030-2024-2-81-88

ВВЕДЕНИЕ

Являясь важнейшим сырьем для производства шоколада и многих других продуктов на его основе, какао-бобы проходят различные технологические процессы, прежде чем попасть к конечному потребителю. Термические подпроцессы представляют собой значительную часть переработки какао, при которой какао-бобы, пасту или смесь в течение определенного времени подвергают воздействию повышенной температуры, чтобы сделать их пригодными для обработки, потребления. Основная цель термической обработки – продлить срок хранения за счет снижения

количества бактерий до приемлемого уровня, а также придать продукту желаемый аромат и вкус. [1] Среди наиболее известных термических подпроцессов при переработке какао – сушка бобов, их обжарка и сушка растворимого какао-порошка. На конечное качество какао-бобов существенное влияние оказывают условия термообработки [2].

Учитывая высокую энергозатратность процессов термической обработки, таких как обжиг и сушка, и растущую стоимость энергии, важно постоянно совершенствовать процессы с целью снижения потребности в энергии (сокращения эксплуатационных затрат) при сохранении или улучшении качественных показателей конечной продукции [3]. Этого можно достичь за счет эффективной автоматизации и контроля термообработки.

Сложность автоматизированного управления термической обработкой пищевой и сельскохозяйственной продукции обусловлена длительными временными задержками в технологическом процессе и преобладанием нелинейности и неопределенностей параметров [4].

В данной статье предложена АСУ термической обработкой какао-бобов на основе алгоритма управления с прогнозирующими моделями (УПМ-регулятора).

СТРАТЕГИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

К основным задачам управления системами термической обработки относятся: поддержание заданной температуры продукта при нарушениях технологического процесса;

максимизация производительности выпуска продукции при сохранении оптимальных эксплуатационных затрат;

предотвращение пересушивания во избежание термического повреждения и роста затрат на электроэнергию, а также недостаточной сушки, приводящей к появлению плесени [5].

К основным параметрам процесса термообработки какао-бобов относятся удельные энергозатраты (на единицу массы испаряемой влаги) и длительность процесса. При конвективной сушке эти параметры определяют качество конечного продукта.

Интенсификация процесса достигается за счет повышения температуры в сушильной камере, которая зависит от температуры входного сушильного воздуха. В результате задача управления терморегулирования сводится к быстрому нагреванию бобов до необходимой температуры и ее поддержанию на протяжении всего процесса.

Существуют разнообразные подходы и методы управления процессами термической обработки сыпучих материалов на различном оборудовании [6]. В рассматриваемой системе процесс можно ускорить, регулируя температуру нагревателя в начале нагрева, чтобы обеспечить прогревание слоя какао-бобов до максимально допустимой температуры (T_{max}). После того как слой нагревается до заданной температуры (T_{set}), нагреватель перенастраивается для ее поддержания. В этом случае установку можно смоделировать как систему с одним входом и одним выходом, где управляющей переменной является температура входящего сушильного воздуха (T_c), а регулируемой переменной – температура продукта (T) в сушильной камере.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Термическая обработка пищевых продуктов и других биологических материалов, таких как какао-бобы, происходит в сушильной камере (рис. 1), где слой бобов подвергается воздействию потока горячего воздуха. При конвективной термообработке в камере одновременно реализуются два транспортных механизма:

1. Передача тепловой энергии от горячего воздуха к поверхности зерен посредством конвекции и последующая передача энергии внутрь зерен посредством проводимости.

2. Перенос влаги изнутри слоя на его поверхность путем диффузии и последующий перенос влаги из поверхностного слоя в воздух путем испарения.

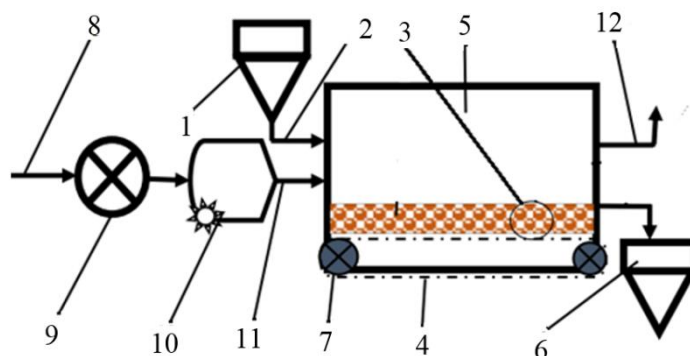


Рис. 1. Технологическая схема сушки какао-бобов: 1 – вход; 2 – входной поток; 3 – слой какао-бобов; 4 – конвейерная лента; 5 – сушильная камера; 6 – выходной поток; 7 – мотор конвейера; 8 – сушильный воздух на впуске; 9 – вентилятор; 10 – нагреватель; 11 – поток горячего воздуха; 12 – выходной поток воздуха

Уравнение теплопроводности для периода нагрева слоя какао-бобов записывается следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = a_p \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2}, \\ \left(\begin{array}{l} \tau > 0, \\ -\ell < x < \ell \end{array} \right), \end{cases} \quad (1)$$

где $T(x, \tau)$ – температурное поле слоя, °С; a_p – коэффициент температуропроводности слоя какао-бобов, м²/с; ℓ – толщина слоя, м.

Начальное условие:

$$\begin{cases} \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = 0, \\ T(x, 0) = T_0 = const, \\ -\lambda_p \frac{\partial T(\ell, \tau)}{\partial x} + [T_c - T(\ell, \tau)] = 0, \end{cases} \quad (2)$$

Уравнение теплопроводности для периода постоянной скорости термообработки слоя какао-бобов принимает вид

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = a_p \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{q_v}{c_p \rho_p}. \quad (3)$$

Начальное условие:

$$\begin{cases} \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial T(l, \tau)}{\partial x} + \frac{\alpha}{\lambda_p} (T_c - T(l, \tau)) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Передаточная функция процесса термообработки какао-бобов получается путем линеаризации уравнений (1)–(4). Для линеаризации использовали метод рядов Тейлора и преобразования Лапласа [1]. Уравнение (3) упрощается с помощью метода матрицы пропускания [7, 8], а затем параметры теплового процесса (как показано в таблице) подставляются в окончательное уравнение.

Параметры процесса термической обработки какао-бобов

Параметр	Обозначение	Значение	Единица измерения
Теплота реакции	q_s	2 402	Дж/кг
Энергия активации	U	22,48	кДж/моль
Универсальная газовая постоянная	R	8 310	Дж/кмоль · К
Температура окружающей среды	T_0	293	К
Температуропроводность	a_p	$3,79 \cdot 10^{-5}$	м ² /с
Коэффициент теплопередачи	a	10	Вт/м ² · К
Теплопроводность	X_p	0,4	Вт/м · К
Удельная теплоемкость	c_p	$3,79 \cdot 10^2$	Дж/кг · К
Плотность	P_p	2 815	кг/м ³

Полученная передаточная функция имеет вид [9]:

$$G_p(s) = \frac{s + 0,397}{0,25s + 0,003 12}$$

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ

Алгоритм MPC (Model Predictive Control) реализуется следующими шагами (рис. 2):

+ Шаг 1: Будущие выходные сигналы находятся в пределах определенного диапазона N , называемого диапазоном прогнозирования, в каждый момент времени t с использованием модели процесса. Прогноз выходных значений: $\hat{y}(k + t|t)$, $k = 1 \dots N$ зависит от значений предыдущих входных и выходных сигналов. Будущий управляющий сигнал $u(t + k|t)$, $k = 1 \dots N - 1$:

$$\hat{y}_{k+i} = d_i(u_k, u_{k+1}, \dots, u_{k+i}), \quad (5)$$

+ Шаг 2: Будущие сигналы управления рассчитываются путем оптимизации критерия, который делает систему похожей на закрытую систему с заданной целевой функцией (6). Этот критерий обычно представляет собой квадратичную функцию ошибки между выходными данными прогноза и заданным значением. Эффективность процесса управления зависит от целевой функции.

$$J(u) = \|Y - R\|_Q^2 + \|\Delta U\|_S^2, \quad (6)$$

где Q, S – веса регуляризации; Y – вектор выходных значений модели, $Y = [\hat{y}_{k+1}, \hat{y}_{k+2}, \dots, \hat{y}_{k+N}]$; R – вектор заданных значений показателей качества, $R = [r_{k+1}, r_{k+2}, \dots, r_{k+N}]$; $\Delta U = [\Delta u_{k+1}, \Delta u_{k+2}, \dots, \Delta u_{k+N}]$ – вектор управляющих воздействий; $\Delta u_{k+i} = u_{k+i} - u_{k+i-1}$.

Учитывая, что

$$\begin{aligned} \|Y - R\|_Q^2 &= \|Y - R\|_Q \|Y - R\|^T \\ \|\Delta U\|_S^2 &= \|\Delta U\|_S \|\Delta U\|^T, \end{aligned}$$

формулу (6) можно записать в виде

$$J(u) = \frac{1}{2} \|Y - R\|_Q \|Y - R\|^T + \frac{1}{2} \|\Delta U\|_S \|\Delta U\|^T.$$

Задача оптимизации целевой функции выполняется с помощью заранее выбранных алгоритмов. Наиболее часто применяемыми алгоритмами для задач оптимизации являются методы внутренней точки, активного набора [10], лагранжиана [11], проекции градиента:

$$\begin{aligned} u &= \arg \min (J(u)); \\ J(u) &= \|Y - R\|_Q \|Y - R\|^T + \|\Delta U\|_S \|\Delta U\|^T \rightarrow \min. \end{aligned}$$

+ Шаг 3: Полученный сигнал управления $u(t|t)$ применяется в процессе, тогда как сигнал управления $u(t + 1|t)$ также рассчитывается, но не используется, поскольку во время выборки $y(t + 1)$ определяется и рассчитывается так же, как и в шаге 1, с новыми значениями. Таким образом, полученное значение $u(t + 1|t + 1)$ отличается от $u(t + 1|t)$, поскольку модель обновляет информацию об объекте.

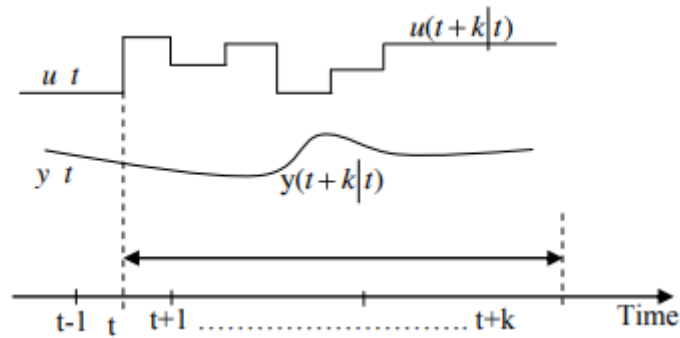


Рис. 2. Алгоритм системы управления с прогнозирующими моделями

Модель прогнозирует выходные данные объекта на основе текущих значений, прошлых значений и будущих сигналов. Сигнал управления определяется оптимизатором.

Прогнозирующий контроллер включает в себя следующие основные компоненты:

- модель системы;
- целевую функцию;
- метод решения оптимизационных задач.

На рис. 3 показана модель системы управления с прогнозирующими моделями.

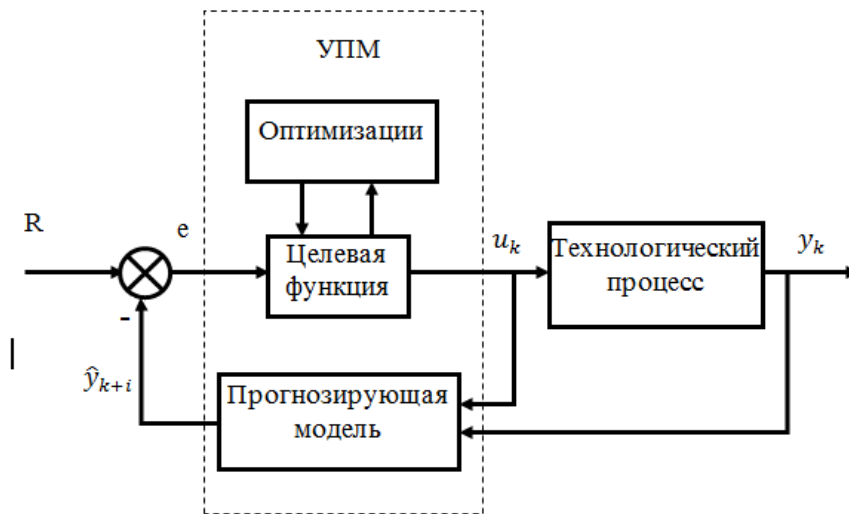


Рис. 3. Модель системы управления с прогнозирующими моделями (УПМ):

y_k – выходной сигнал реальной системы;
 u_k – сигнал управления объектом в момент времени k

РЕЗУЛЬТАТЫ

Математическая модель описанной выше пилотной сушилки с заданными стратегиями управления была реализована в среде Matlab с использованием набора инструментов Simulink. Применялась система с прогнозирующими моделями управления температурой подаваемого осушающего воздуха (рис. 4).

Моделирование проводилось в системе с обратной связью для отслеживания заданной температуры выходных зерен. Данная система управления обеспечивает стабильность требуемых параметров.

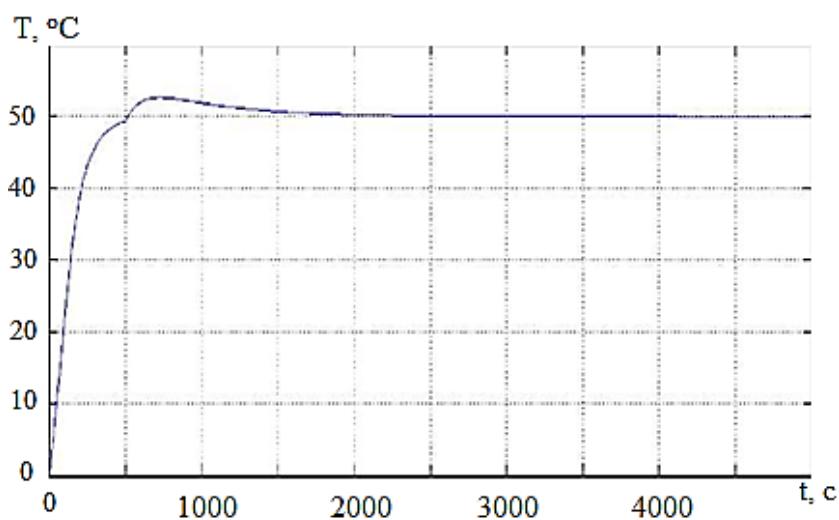


Рис. 4. График реакции контроллера в среде Matlab с использованием набора инструментов Simulink

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Процессы термической обработки моделируются как непрерывная пространственно распределенная система с одним входом и одним выходом, где регулирующей переменной является температура сушильного воздуха, а регулируемой – температура продукта в сушильной камере. Были применены алгоритмы системы управления с прогнозирующими моделями в процессе сушки какао-бобов. В целом результаты численного моделирования показывают, что УПМ-регулятор стабилен при управлении процессом сушки какао-бобов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 20-07-00914.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чохонелидзе А.Н., Лемпого Ф., Браун-Аквей В. Математическая модель для процесса термообработки какао-бобов // *Вестник евразийской науки*. 2014. № 6 (25). С. 126.
2. Медведев П.В., Федотов В.А. Технология производства продуктов питания из растительного сырья: учебное пособие. Оренбург: ОГУ, 2021. 96 с.
3. Ефимов А.В., Чернов В.П. Термовременная обработка отливок из стали марки 150ХНМ // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета имени Г.И. Носова*. 2017. № 15 (1). С. 79–85.
4. Areed F.F.G., El-Kasassy M.S., Mahmoud K.A. Design of Neuro-fuzzy Controller for a Rotary Dryer // *International Journal of Computer Applications*. 2012. V. 37. № 5. P. 34–41.
5. Шишацкий Ю.И., Агафонов Г.В., Никель С.А., Семенихин О.А. Повышение эффективности процесса тепловой обработки какао-бобов и арахиса. М.: Пищепромиздат, 2007. 133 с.
6. Дадиев Р.Ю., Шумихин А.Г., Корнилицин Д.К. Существующие подходы к автоматизации процесса сушки материалов в режиме кипящего слоя // *Инженерный вестник Дона*. 2022. № 5 (89). С. 118–129.

7. Vajta M. Nyquist Stability Test for a Parabolic Partial Differential Equation // *IASTED Conf. on Modeling, Identification and Control*. Innsbruck, Austria. 2000. P. 296–299.
8. Pedro J.O., Dangor M., Dahunsi O.A., Montaz Ali M. Differential Evolution-Based PID Control of Nonlinear Full-Car Electrohydraulic Suspensions // *Mathematical Problems in Engineering*. 2013.
9. Лемпого Ф. Моделирование и управление технологическим процессом термообработки какао-бобов. Дисс... канд. техн. наук. Тверь, 2015. 174 с.
10. Civicioglu P. Backtracking Search Optimization Algorithm for Numerical Optimization Problems // *Applied Mathematics and Computation*. 2013. V. 219. № 15. P. 8121–8144.
11. Стороженко Н.Р., Голева А.И., Шафеева О.П. Моделирование информационных процессов в сети с использованием методов линейного и нелинейного программирования // *Россия молодая: передовые технологии – в промышленность!* 2017. № 2. С. 27–30.

Для цитирования: Фам К.Б., Мурашев П.М., Богатиков В.Н., Киеу С.М. Автоматизированное управление процессом термообработки какао-бобов с помощью алгоритма с прогнозирующими моделями // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 2 (22). С. 81–88.

AUTOMATED CONTROL OF HEAT TREATMENT PROCESS OF COCOA BEANS USING AN ALGORITHM WITH PREDICTIVE MODELS

K.B. FAM¹, postgraduate, P.M. MURASHEV¹, postgraduate,
V.N. BOGATIKOV¹, Dr. Sc, S.M. KIEU², magister

¹Tver State Technical University,
22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver, e-mail: phambang79520897405@gmail.com

²Military Academy of Aerospace Defense
named after Marshal of the Soviet Union G.K. Zhukov
50, Zhigareva st., 170022, Tver

The article describes the design and modeling of an automated control system (ACS) based on the UPM controller algorithm for controlling the heat treatment of cocoa beans in a belt conveyor dryer. Heat treatment processes are modeled as a continuous, spatially distributed system with one input and one output, where the controlled variable is the temperature of the incoming drying air, and the controlled variable is the temperature of the product in the drying chamber. The requirements for the software and hardware of the automated control system are presented and discussed. The numerical simulation of the automated control system was carried out using the Matlab application software package. The results of numerical simulation are presented, confirming that the UPM controller is stable and stable with respect to input interference. It is shown that the system provides a rapid response to displacement and elimination of the steady-state error during heat treatment.

Keywords: MPC regulator, heat treatment, cocoa, automated control, control strategy, mathematical model.

Поступила в редакцию/received: 22.01.2024; после рецензирования/ revised: 6.02.2024;
принята/accepted: 15.02.2024