

## Разработка автоматической системы управления камерой копчения колбасы

*М.А. Сафин, И.С. Квасова*

*Казанский государственный энергетический университет, Казань*

**Аннотация:** В данной статье рассматривается вопрос о разработке автоматической системы управления камерой копчения колбасы. Ручное управление процессом копчения может привести к ошибкам и неравномерности, поэтому автоматизация становится необходимостью. Система регулирования камеры копчения работает по двум контурам - температурному и влажностному. Автоматическая система управления камерой копчения обеспечивает оптимальные условия для копчения продуктов. В статье представлены передаточные функции для каждого контура и структурная схема системы управления. Коэффициенты, использованные в расчетах, были получены из экспериментов, проводимых на производстве колбасы в Ижевске. В статье проводится анализ устойчивости системы путем расчетов и проверки в среде Matlab Simulink. На основании проверки было выяснено, что разработанная нами система автоматического управления камеры копчения колбасы является рабочей.

**Ключевые слова:** камера копчения, объект управления, контур управления по влажности, контур управления по температуре, система автоматического управления.

В современном мире автоматизация является неотъемлемой частью промышленности во многих областях, включая производство колбас. В производстве колбасы одним из ключевых процессов является копчение, которое придает ей неповторимый вкус и аромат. Ручное управление процессом копчения колбасы может привести к ошибкам и неравномерности копчения, что может негативно сказаться на качестве продукта. Поэтому в данной статье рассматривается вопрос о разработке автоматической системы управления камерой копчения колбасы.

Подробнее изучим камеру для копчения колбасы. Система регулирования камеры копчения работает по двум контурам – температурному и влажностному. Входными параметрами являются тепло (Т), выделяемое трубчатым электронагревателем (далее ТЭН), и воздух (Воз). Количество подаваемого тепла и воздуха регулируются с помощью задатчиков (З), а величина задающего воздействия определяется программируемым логическим контроллером (далее ПЛК). Структурная

---

схема данной камеры в качестве объекта управления представлена на рис. 1.

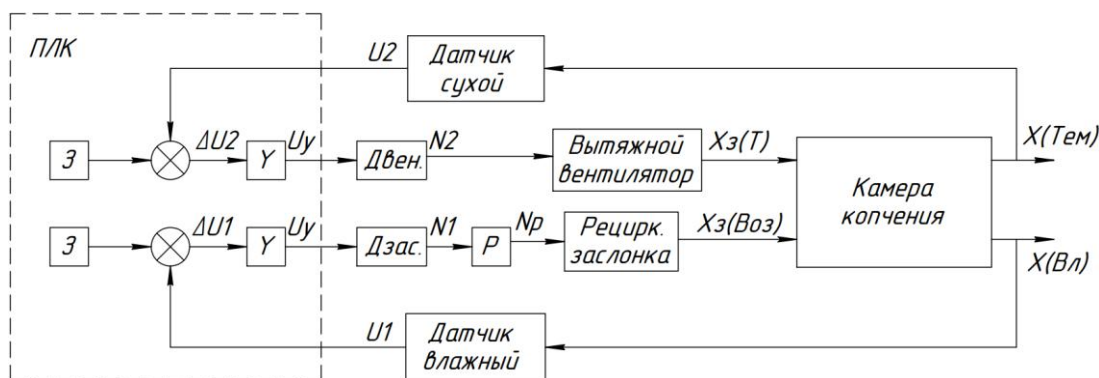


Рис. 1. - Структурная схема камеры копчения

Для температурного контура начальный сигнал производят термометры, которые определяют температуру (Тем) в камере. Датчики преобразуют этот сигнал в напряжение ( $U1$  и  $U2$ ), которое затем передается на соответствующий сумматор, где происходит сравнение значений с установленным. Разница усиливается усилителями ( $У$ ) и влияет на двигатель вытяжного вентилятора (Двен), а следовательно, и на его работу. Если температура превышает заданную, вентилятор начинает работать, выводя из камеры воздух и понижая температуру. Если температура опускается ниже установленной, вентилятор выключается, что приводит к увеличению температуры. Если температура достигает критического значения, то ПЛК подает сигнал и ТЭН автоматически отключается [1].

Для влажностного контура начальный сигнал также производят датчики, которые определяют уровень влажности (Вл) в камере. Разница между заданным уровнем влажности и фактическим уровнем влажности усиливается в усилителе ( $У2$ ) и передается на двигатель рециркуляционной заслонки (Дзас) [2]. Обороты двигателя через редуктор ( $Р$ ) далее превращаются в отклонение заслонки. Заслонка управляет уровнем влажности в камере, открываясь или закрываясь в зависимости от уровня влажности. Если влажность превышает установленную, запускается механизм выпуска пара и заслонка открывается. Этот процесс происходит в

обратном порядке, когда уровень влажности уменьшается [3].

Для каждого звена системы составлено дифференциальное уравнение, которое позволяет описать динамику процессов и принять необходимые решения в случае необходимости [4, 5]. В целом, система регулирования камеры копчения позволяет поддерживать оптимальные условия для копчения продуктов [6].

Для контура, который отвечает за регулирование температуры (1 контура), получим передаточную функцию  $x(s)$ :

$$\begin{aligned}\Phi_{X_3}(s) &= \frac{x(s)}{x_3(s)} = \left( \frac{ce^{-\tau_0 s}}{s(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \right) / \left( 1 + \frac{c_6 c e^{-\tau_0 s}}{s(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \right) = \\ &= \left( \frac{ce^{-\tau_0 s}}{s(T_1 s + 1)(T_2 s + 1) + c_6 c e^{-\tau_0 s}} \right); \\ x(s) &= \frac{x_3 c e^{-\tau_0 s}}{s(T_3 s + 1)(T_2 s + 1)(T_1 s + 1) + c_6 c e^{-\tau_0 s}},\end{aligned}$$

где  $c = c_7 c_8 c_c$

Для контура, который отвечает за регулирование влажности (2 контура), получим передаточную функцию  $x'(s)$ :

$$\begin{aligned}\Phi_{X'_3}(s) &= \frac{x'(s)}{x'_3(s)} = \left( \frac{ce^{-\tau_0 s}}{s(T_3 s + 1)(T_2 s + 1)(T_1 s + 1)} \right) / \left( 1 + \frac{c_1 c e^{-\tau_0 s}}{s(T_3 s + 1)(T_2 s + 1)(T_1 s + 1)} \right) = \\ &= \left( \frac{ce^{-\tau_0 s}}{s(T_3 s + 1)(T_2 s + 1)(T_1 s + 1) + c_1 c e^{-\tau_0 s}} \right); \\ x'(s) &= \frac{x'_3 c e^{-\tau_0 s}}{s(T_3 s + 1)(T_2 s + 1)(T_1 s + 1) + c_1 c e^{-\tau_0 s}},\end{aligned}$$

где  $c = c_2 c_3 c_4 c_5 c_c$ .

Схема управления камерой копчения примет следующий вид, представленный на рис. 2.

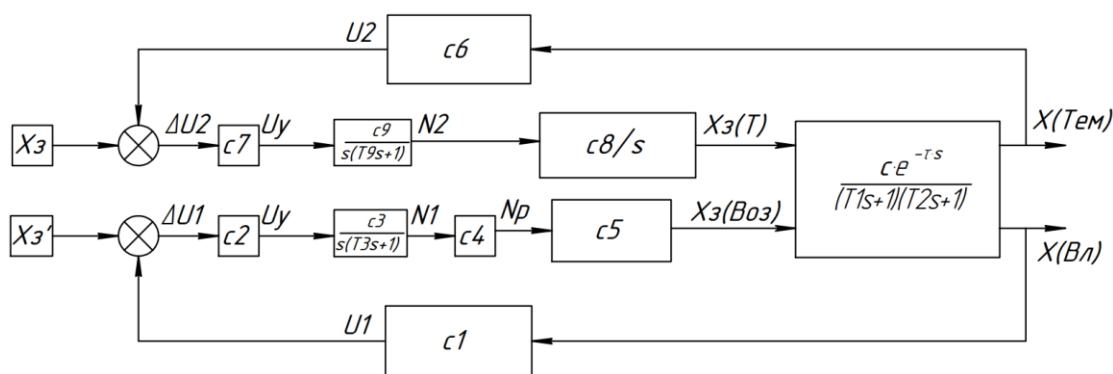


Рис. 2. - Структурная схема камеры копчения

Коэффициенты  $c$ ,  $c1$ ,  $c2$ ,  $c3$ ,  $c4$ ,  $c5$ ,  $c6$ ,  $c7$ ,  $c8$ ,  $c9$  использованные далее были взяты из экспериментальных расчетов, проведенных на производстве по копчению колбас в Ижевске. Эти расчеты были основаны на анализе и оптимизации процесса копчения колбасных изделий с целью достижения оптимальной температуры и влажности копчения колбасы. Во время экспериментов на заводе были изменены значения коэффициентов и произведено наблюдение за реакцией системы на изменения. После анализа результатов экспериментов были выбраны оптимальные значения коэффициентов, которые обеспечивали стабильную и точную регулировку температуры и влажности копчения.

При подстановке параметров настройки управляющего устройства получим передаточную функцию для контура управления по температуре (1 контура):

$$W(s) = \frac{c e^{-\tau_0 s}}{s(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} = \frac{100 e^{-300s}}{s(3600s + 1)(900s + 1)},$$

где  $c = c_7 c_8 c_c = 100 \cdot 1 \cdot 1 = 100$ .

Используем пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор (далее ПИД-регулятор):

$$W_p(s) = \frac{c_p (T_u s + 1)(T_d s + 1)}{T_u s},$$

где  $c_p = 0.16$ ;  $T_u = T_2 = 3600$  с.;  $T_\partial = 900$  с.

$$W_p'(s) = \frac{16e^{-300s}}{s^2 3600}.$$

Система автоматического управления (далее САУ) для камеры копчения колбасы может иметь некоторые недостатки, такие как неустойчивость и астатизм. Однако, с помощью дифференциального корректирующего сигнала, который определяется в соответствии с определенной передаточной функцией, мы можем уменьшить степень астатизма и сделать систему более устойчивой. Для этого используем следующую передаточную функцию:

$$W_k(s) = \frac{T_s}{T_s + 1};$$

При выполнении аналогичного условия, что  $T = 0.5$  с. передаточная функция САУ регулирования влажности примет вид:

$$W(s) = \frac{8e^{-300s}}{s 3600(0.5s+1)}. \quad (1)$$

Аналогично для контура управления по влажности получим передаточную функцию управляющего устройства для 2 контура:

$$W'(s) = \frac{ce^{-\tau_0 s}}{s(T_1 s+1)(T_2 s+1)(T_3 s+1)} = \frac{200e^{-300s}}{s(900s+1)(3600s+1)(0.5s+1)},$$

где  $c = c_2 c_3 c_4 c_5 c_c = 2 \cdot 100 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 200$ .

Используем ПИД-регулятор:

$$W_p(s) = \frac{c_p(T_u s+1)(T_\partial s+1)}{T_u s},$$

где  $c_p = 0.28$ ;  $T_u = T_2 = 3600$  с.;  $T_\partial = 900$  с.

$$W_p'(s) = \frac{28e^{-300s}}{s^2 3600(0.5s+1)}.$$

Добавим дифференциальную составляющую, чтобы скорректировать

ошибку:

$$W_k(s) = \frac{T_s}{T_s + 1}; \quad (2)$$

При  $T = 0.5$  с. передаточная функция САУ регулирования температуры принимает вид:

$$W'(s) = \frac{14e^{-300s}}{s3600(0.5s+1)^2}; \quad (3)$$

Для проверки правильности работы разработанной модели САУ камеры копчения колбасы мы используем пакет Matlab Simulink [7]. С помощью этого пакета мы можем смоделировать систему и проверить ее работоспособность [8]. Для этого мы поочередно подаем ступенчатый сигнал на каждый контур системы, температурный или влажностный, и измеряем полученные значения [9]. На рис. 3 представлен контур температуры. Из рисунка 3 мы можем сделать вывод, что переходный процесс длится 45 секунд, при этом контур температуры достаточно инерционный. Это объясняется тем фактом, что изменение температуры в камере не может происходить мгновенно, требуется определенное время для ее установления.

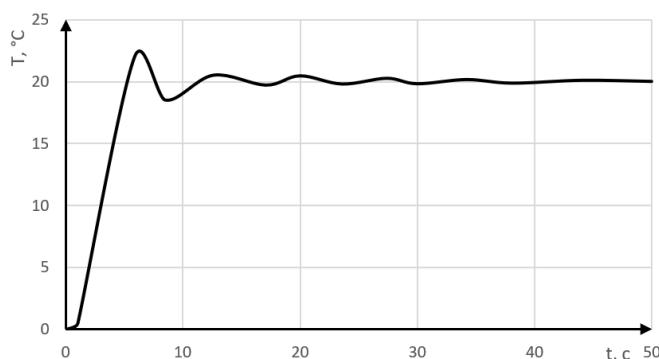


Рис. 3 - График переходного процесса контура регулирования температуры

На рис. 4 представлен контур влажности. Исходя из рис. 4 можно заметить, что переходный процесс также продолжительный, так как имеется прямая зависимость от температуры.

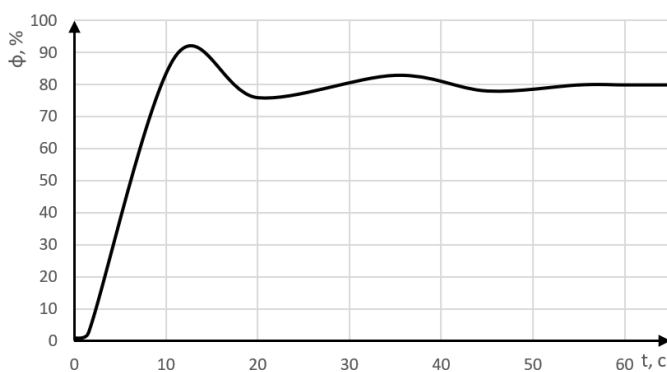


Рис. 4 - График переходного процесса контура регулирования влажности

Моделирование показало, что математическая модель камеры копчения является устойчивой, что подтверждает возможность ее использования в качестве реально работающей системы [10].

Один из примеров успешного внедрения автоматической системы управления камерой копчения колбасы является предприятие по производству копченых колбас в городе Ижевск. Данное предприятие реализовало установку системы управления для одной из камер копчения в 2022 году. Вскоре после установки системы управления копчением колбас, предприятие отметило положительный результат. Производительность увеличилась на 20%, что привело к увеличению мощности производства. Кроме того, качество продукции значительно повысилось, за счет того, что уровень консистенции колбасы достиг стандартов качества и требований нормативных актов. Контроль технологических параметров, выполняемый автоматически, исключил возможность ошибок, связанных с человеческим фактором, что повысило надежность производственного процесса. Это показывает, что внедрение автоматической системы способствует оптимизации технологического процесса и увеличению прибыли предприятия.

### Литература

1. Соколова В.А. Основы автоматизации технологических процессов пищевых производств. М.: Легкая и пищевая промышленность,



1983. 400 с.

2. Анхимюк В.Л. Теория автоматического регулирования. М.: Мангуст, 2000. 144 с.

3. Технологическая схема производства сырокопченых колбас // Лекции.ком URL: [lektsii.com/2-105451.html?ysclid=lfpc16bdj845952729](https://lektsii.com/2-105451.html?ysclid=lfpc16bdj845952729) (дата обращения: 26.03.2023).

4. Широков Л. А., Михайлов В. И., Фельдман Р. З. Автоматизация производственных процессов и АСУ ТП в пищевой промышленности /; М.: Агропромиздат, 1986. 311 с.

5. Колесникова А.И. Разработка системы управления компрессорной установкой // Тинчуринские чтения - 2022 "Энергетика и цифровая трансформация»: Сборник статей по материалам конференции. В 3-х томах, Казань, 27–29 апреля 2022 года Том 2. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2022. – С. 425-427. – EDN СВЮЕР.

6. Пупков К.А., Егупов Н.Д. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т. 1: Математические модели, динамические характеристики и анализ систем автоматического управления. – М.: Изд-во МВТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 656 с.

7. Медведева Л.И., Семенова И.А. Анализ структуры и состава системы управления технологическими параметрами в процессе рекуперации бензина // Инженерный вестник Дона, 2013, № 4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2032](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2032)

8. Кралин А.А., Алтунин Б.Ю. Моделирование трансформаторов преобразовательных агрегатов в Simulink // Инженерный вестник Дона, 2014, № 2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2362](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2362)

9. Domakhin E. A., Popov N. S., Vilberger M. E., Anibroev V. I., Singizin I. I. Comparative analysis and experimental verification of simulation

---



modelling approach in MATLAB-Simulink and SimInTech // ITBI. - 2020. - №1661. - С. 1-6.

10. Ong C.M. Dynamic simulation of electric machinery using MatlabSimulink, New Jersey, Prentice Hall PTR, 1998, 626 pp

### References

1. Sokolova V.A. Osnovy avtomatizatsii tekhnologicheskikh protsessov pishchevykh proizvodstv [Fundamentals of automation of technological processes in food production]. M.: Legkaya i pishchevaya promyshlennost', 1983. 400 p.

2. Ankhimiyuk V.L. Teoriya avtomaticheskogo regulirovaniya [Automatic regulation theory], M.: Mangust, 2000. 144 p.

3. Tekhnologicheskaya skhema proizvodstva syropochenykh kolbas [Technological scheme for the production of raw smoked sausages] Lektsii.kom URL: [lektsii.com/2-105451.html?ysclid=lfpcl6bdj845952729](http://lektsii.com/2-105451.html?ysclid=lfpcl6bdj845952729) (assessed: 26/03/2023)

4. Shirokov L. A., Mikhaylov V. I., Fel'dman R. 3. Avtomatizatsiya proizvodstvennykh protsessov i ASU TP v pishchevoy promyshlennosti [Automation of production processes and automated process control systems in the food industry]. M.: Agropromizdat, 1986. 311 p.

5. Kolesnikova. A. I. Tinchurinskiye chteniya - 2022 "Energetika i tsifrovaya transformatsiya": Sbornik statey po materialam konferentsii. V 3-kh tomakh. Kazan. 27–29 aprelya 2022 goda Tom 2. Kazan: Kazanskiy gosudarstvennyy energeticheskiy universitet. 2022. P. 425-427. EDN CBJOER.

6. Pupkov K.A., Egupov N.D. Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya. T. 1: Matematicheskie modeli, dinamicheskie kharakteristiki i analiz sistem avtomaticheskogo upravleniya [Methods of classical and modern theory of automatic control. T. 1: Mathematical models, dynamic characteristics and analysis of automatic control systems]. M.: Izd-vo MVTU im. N.E. Baumana, 2004. 656 p.

---



7. Medvedeva L.I., Semenova I.A. Inzhenernyy vestnik Dona, 2013, № 4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2032](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2032)
8. Kralin A.A., Altunin B.Yu. Inzhenernyy vestnik Dona, 2014, № 2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2362](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2362)
9. Domakhin E. A., Popov N. S., Vilberger M. E., Anibroev V. I., Singizin I. I. Comparative analysis and experimental verification of simulation modelling approach in MATLAB-Simulink and SimInTech ITBI. 2020. №1661. P. 1-6.
10. Ong C.M. Dynamic simulation of electric machinery using MatlabSimulink, New Jersey, Prentice Hall PTR, 1998, 626 pp