

Об авторах:

АХРЕМЧИК Павел Олегович – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: axremchic@mail.ru

АХРЕМЧИК Олег Леонидович – доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации технологических процессов, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: axremchic@mail.ru

About the authors:

AKHREMCHIK Pavel Olegovich – Master's Student, Tver State Technical University, Tver. E-mail: axremchic@mail.ru

AKHREMCHIK Oleg Leonidovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Process Automation, Tver State Technical University, Tver. E-mail: axremchic@mail.ru

УДК 620.3.51

## ФОРМИРОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЙ ПРИ СУШКЕ СУБСТАНЦИЙ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПОВ ТАКАГИ – СУГЕНО

Н.В. Кузнецов, О.Л. Ахремчик

© Кузнецов Н.В., Ахремчик О.Л., 2025

**Аннотация.** В системе управления сушкой субстанций микроводорослей выделяется контур управления температурой сушильного агента. Корректирующее воздействие на изменение мощности нагревателя рассчитывается на основе ошибки разности температур сушильного агента на входе и выходе сушильной камеры и ее скорости. Нечеткие регуляторы системы управления осуществляют логический вывод с использованием пяти термов для ошибки и трех термов для скорости ошибки. Приведен пример вида функций для промежуточной координаты и осуществления корректирующего воздействия при управлении мощностью нагревателя.

**Ключевые слова:** управление, нечеткий регулятор, воздействие, сушильный агент, нагреватель.

Объектами исследования авторов являются модули и модели систем управления распылительных сушилок. Предыдущие исследования выполнялись для контура контроля расхода и параметров субстанций, в качестве

которых рассматривались суспензии микроводоросли хлорелла с выхода биореактора [1]. С учетом многоконтурности систем управления необходимо рассмотреть контур контроля температуры сушильного агента. В качестве агента используется очищенный подогретый воздух, проходящий через нагреватель. Предполагается, что нагрев происходит в электронагревателе (рис. 1). Смешиваясь с сушильным агентом, суспензия теряет влагу, и на выходе сушильной камеры образуются порошок микроводоросли и смесь пара и воздуха (см. «Сушильный агент» на рисунке).

Разность температур сушильного агента на входе и выходе сушильной камеры  $\Delta T = T^{\text{вх}} - T^{\text{вых}}$  коррелирует с влажностью порошка, и ее поддержание на заданном уровне  $\Delta T^{\text{зад}}$  является целью управления. В рассматриваемом контуре управления задача поддержания в установленных пределах ошибки  $e = \Delta T - \Delta T^{\text{зад}}$  решается посредством добавления корректирующей поправки  $P^{\text{кор}}$  к рассчитываемому значению мощности  $P_1$  на верхнем уровне системы управления сушилкой на основе заданного  $T^{\text{ex}}$  и измеренного значений расхода суспензии. Таким образом, мощность нагревателя определяется как  $P = P_1 + P^{\text{кор}}$ .

В работе используются нечеткие регуляторы (на рис. 1 обозначены как «НР») для выработки управлений. Расчет управляющих воздействий осуществляется на основе принципа Такаги – Сугено [3].

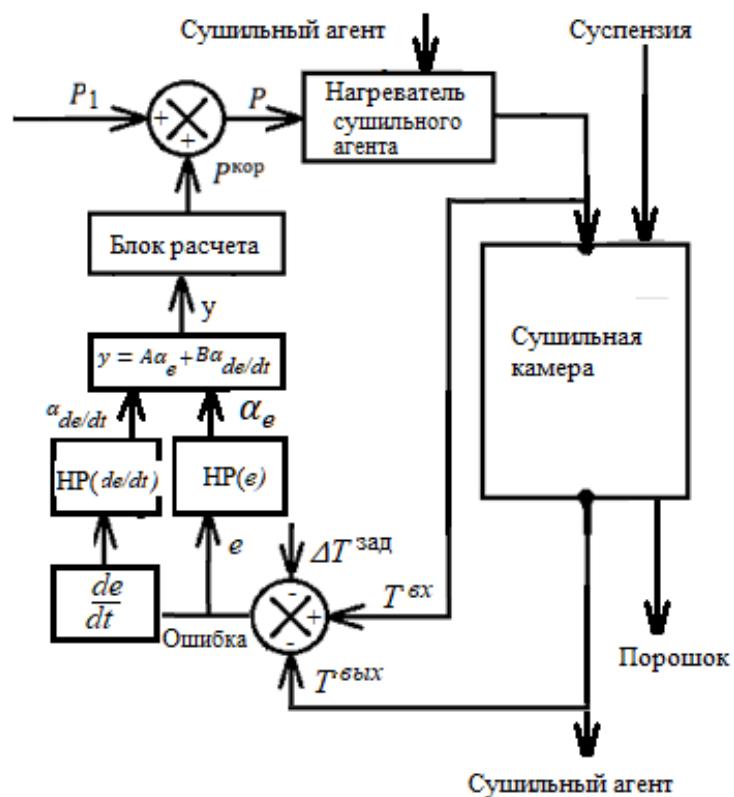


Рис. 1. Состав системы управления температурой сушильного агента

На входы нечетких регуляторов подаются ошибка управления  $e$  и скорость ее изменения  $de / dt$ . На выходе каждого нечеткого регулятора формируются управления  $\alpha_e$  и  $\alpha_{de/dt}$ , используемые для формирования промежуточной координаты [4]:

$$y = A * U(e) + B * U(de / dt); \quad A + B = 1,$$

где  $A$  и  $B$  – весовые коэффициенты, определяемые из возможных значений выходной переменной.

Корректирующая поправка

$$P^{\text{кор}} = k \cdot y,$$

где  $k$  – масштабирующий множитель.

Для переменной  $e$  в нечетком выводе используются пять термов: «большая отрицательная», «отрицательная», «нулевая», «положительная», «большая положительная». Для переменной  $de / dt$  в системе управления используются три терма: «отрицательная», «нулевая», «положительная».

Процедура логического вывода  $\alpha_e$  и  $\alpha_{de/dt}$  для каждого правила присваивает степень его истинности значению функции принадлежности соответствующего терма переменной. Изменение управлений зависит от экспертной настройки параметров функций принадлежности по 14 параметрам (рис. 2).

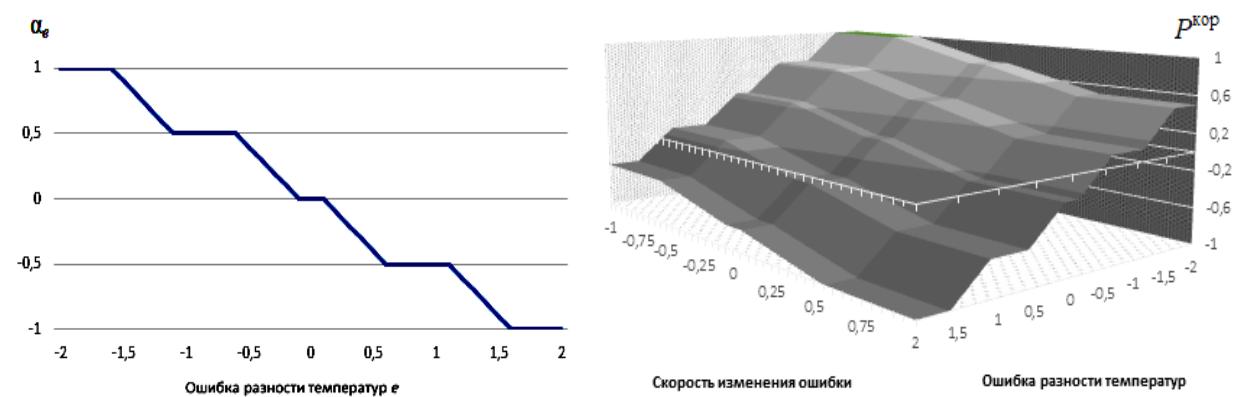


Рис. 2. Графики функций нечеткого вывода  
для управлений  $\alpha_e$  и  $P^{\text{кор}}$

С учетом влияния на корректирующее воздействие при управлении температурой не только ошибки, но и скорости ее изменения выходное воздействие, получаемое по методу Такаги – Сугено, можно аппроксимировать нисходящей к максимальному значению ошибки поверхностью, состоящей из фрагментов, площадь которых зависит от функций принадлежности нечетких термов. График функций вывода для

ошибки разности температур имеет меньше изломов и больше горизонтальных площадок по сравнению с графиком, показанным на рис. 2.

Применение принципа Такаги – Сугено позволяет получить более быструю сходимость алгоритма вывода управления  $u$ , что важно при небольших размерах сушилок и значительных расходах сушильного агента.

Реализация принципа Такаги – Сугено не отражается в технической документации программ моделирования, что не позволяет внести изменения для расчета коэффициентов в системы инженерных расчетов. В то же время выработка рекомендаций по оценке и методам настройки нечетких регуляторов в составе систем управления сушилками супензий является перспективным направлением исследований.

### **Библиографический список**

1. Ахремчик О.Л., Кузнецов Н.В. Управление сушкой супензии хлореллы с учетом вязкости // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2024. № 2 (22). С. 100–107. DOI: 10.46573/2658-5030-2024-2-100-107
2. Ахремчик О.Л., Кузнецов Н.В. Нечеткие регуляторы в системе автоматизации процесса сушки супензий микроводорослей // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Серия «Электротехника, информационные технологии, системы управления». 2024. № 51. С. 20–39. DOI: 10.15593/2224-9397/2024.3.02
3. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy Identification of Systems and its Applications to Modeling and Control // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 1985. Vol. 15. No. 1. P. 116–32.
4. Куликова И.В. Моделирование синтеза нечетких регуляторов типа Такаги – Сугено – Канга в некоторых системах управления // Вестник Тюменского государственного университета. Серия «Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика». 2021. Т. 7. № 2 (26). С. 147–169.

## **CONTROL FORMATION UNDER DRYING MICROALGAE SUBSTANCES BASED ON TAKAGI – SUGENO PRINCIPLES**

**N.V. Kuznetsov, O.L. Akhremchik**

***Abstract.*** *In the microalgae substance drying control system, a drying agent temperature control loop is defined. Corrective effect on heater power variation is calculated on the basis of drying agent temperature difference error*

*at drying chamber inlet and outlet and its rate. Fuzzy control system regulators perform logic inference using five terms for error and three terms for error rate. An example of the kind of functions for intermediate coordinate and corrective action in heater power control is given.*

**Keywords:** control, fuzzy regulator, exposure, drying agent, heater.

Об авторах:

КУЗНЕЦОВ Николай Викторович – аспирант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: nikola9841@gmail.com

АХРЕМЧИК Олег Леонидович – доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации технологических процессов, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: axremchic@mail.ru

About the authors:

KUZNETSOV Nicolay Viktorovich – Postgraduate Student, Tver State Technical University, Tver. E-mail: nikola9841@gmail.com

AKHREMCHIK Oleg Leonidovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Process Automation, Tver State Technical University, Tver. E-mail: axremchic@mail.ru

УДК 331.45

## ЦИФРОВИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ УЧЕТА, ХРАНЕНИЯ И ВЫДАЧИ СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ

**Н.Г. Марилов, Л.В. Козырева, З.Б. Калиакберова**

© Марилов Н.Г., Козырева Л.В.,  
Калиакберова З.Б., 2025

**Аннотация.** Статья посвящена вопросам цифровизации процессов учета, хранения и выдачи средств индивидуальной защиты на производственных предприятиях. Рассмотрены основные проблемы, связанные с традиционными методами учета средств индивидуальной защиты, такие как высокая нагрузка на ответственных лиц, риск ошибок при выдаче и отсутствие четких нормативных инструкций по внедрению цифровых решений. Предложены пути внедрения современных технологий, включая RFID-идентификацию, автоматизированные системы выдачи, цифровые базы данных, которые позволяют