

СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ В ТЕПЛОБМІННИКАХ ТЕМПЕРУЮЧИХ МАШИН

Анотація. Проаналізувавши рівень автоматизації обладнання сучасних кондитерських виробництв, автори прийшли до висновку, що на кондитерських фабриках здебільшого використовують окремі готові автоматизовані комплекси й потокові лінії, які побудовані на локальних засобах автоматики, що виконують технологічні операції у відповідності із заданою послідовністю та не враховують зовнішні збурення, котрі потім відбиваються на якості кінцевої продукції. **Метою** роботи є дослідження процесу зміни температури в темперуючій камері автоматизованої системи виготовлення шоколадних цукерок та забезпечення необхідної температури пралинової маси; порівняння методів регулювання температури, визначення найкращого методу регулювання. Авторами виявлено, що в наш час для управління температурними режимами здебільшого використовуються двопозиційні регулятори, пропорційно-інтегрально-диференціальні (ПІД) регулятори, а також регулятори, які працюють на основі нечіткої логіки. Проведені дослідження та отримані **результати** порівняльного аналізу підтримки заданої температури в теплообмінникові темперуючої машини з різними типами регуляторів. Дослідження дозволяють зробити **висновки**, що найгіршим з трьох досліджуваних регуляторів виявився двопозиційний регулятор, він має значні коливання регульованої температури та швидкий вихід з ладу виконавчого елемента. ПІД-регулятор, робота якого базується на методах чисельної інтеграції та диференціюванні вхідного сигналу, показав кращі характеристики, до того ж ПІД-регулятор є дуже простим в налаштуванні. Найкращим же виявився регулятор температури на основі нечіткої логіки, який показав найвищу точність підтримки температури, але в той же час він є складнішим в налаштуванні, в чому суттєво програє ПІД-регулятору. Проведені розрахунки показали, що незважаючи на певні недоліки, регулятор температури на основі нечіткої логіки забезпечить економію енергоресурсів на 2,39 і 3,68 % у порівнянні з двопозиційним та ПІД-регулятором.

Ключові слова: система керування, теплообмінник, регулятор, темперування, математична модель.

Вступ

Постановка проблеми. Однією з перспективних галузей, які визначають економічний розвиток країн світу, є кондитерське виробництво. Це пояснюється тим, що кондитерські вироби є висококалорійним, енергетично цінним продуктом, крім того, вони мають високий попит у населення. Автоматизація технологічних процесів кондитерських підприємств дає змогу підвищувати як кількість, так і якість продукції.

Оптимальне протікання технологічних процесів, котре є недоступним для ручного керування, забезпечують автоматичні системи управління разом з інформаційно-вимірювальними системами. Автоматизація виробництва дозволяє ефективно використовувати всі ресурси і вирішує проблеми покращення якості та здешевлення кондитерської продукції, також зменшуються доволі значні витрати на її виготовлення.

Крім того, це дозволяє скоротити втрати швидкопсувної сировини, значно знизити обсяги незавершеного виробництва, а також дає змогу поліпшити умови роботи працівників галузі.

Головними операціями при виготовленні різноманітних кондитерських виробів є операції глазурування, темперування та охолодження.

Застосування сучасних мікропроцесорних засобів при регулюванні температури дає можливість для вдосконалення управління цими технологічними операціями,

Ці засоби дають змогу зменшувати час регулювання, помилку регулювання в усталеному режимі, величину перерегулювання, тобто покращувати технологічний процес в цілому і забезпечувати плавне його протікання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В роботі був переглянутий ряд джерел, що присвячені розгляду основних питань технології кондитерського виробництва та застосування у ньому засобів автоматизації. З інформації, приведеної в роботах [1-5] можна зробити висновок, що на сучасних кондитерських фабриках в основному використовують окремі готові автоматизовані комплекси й потокові лінії, які побудовані на локальних засобах автоматики. Ці лінії здебільшого працюють у відповідності з чітко заданою послідовністю усіх технологічних операцій та не враховують зовнішні збурення, котрі потім відбиваються на якості кінцевої продукції.

За функціонально-алгоритмічною ознакою такі автоматизовані лінії відносяться до систем логіко-програмного керування групою однотипних технологічних операцій.

В основі роботи ліній лежить пряме цифрове керування [6-11], яке здійснюється по жорсткій або напівжорсткій програмі в режимі поділу часу між керованими операціями.

Лінії відрізняються високою надійністю обладнання, гарною організацією усього технологічного процесу та його обслуговування. Головним недоліком є те, що такі автоматизовані лінії управляються оператором вручну у відповідності із завданнями,

котрі отримуються від головного технолога та планового відділу підприємства.

Слід зазначити, що оператор не має можливості швидко корегувати хід процесу у випадку відхилення, бо перебір і коректування керуючих впливів забирає значний час.

При аналізі літературних джерел по темі можна зробити висновок, що питання комплексної автоматизації кондитерських підприємств ще недостатньо досліджені, контроль кінцевої якості продукції також недостатній.

Мета роботи – дослідження процесу зміни температури в темперуючій камері автоматизованої системи виготовлення шоколадних цукерок та забезпечення необхідної температури пралінової маси; порівняння методів регулювання температури, визначення кращого методу регулювання.

Основна частина

Пралінові конфети виготовляють з горіхової маси (праліне), вкритою шоколадною глазур'ю. Для отримання пралінової маси беруть обсмажені горіхи (мигдаль, фундук, волоський, кеш'ю), подрібнюють їх та змішують з цукром, какао-маслом та твердими жирами.

Операція темперування є основною технологічною операцією, котра виконується перед тим, як шоколадна маса перетворюється на шоколадні вироби. При виготовленні глазурованих цукерок цю масу також використовують у якості глазурі.

Ця операція – складний багатофакторний технологічний процес, при виборі його температурних параметрів враховується навіть температура у виробничому приміщенні. Для здійснення процесу темперування використовують темперуючі машини.

Розрізняють темперуючі машини як періодичної, так і безперервної дії.

В основі конструкції темперуючої машини періодичної дії лежить спеціальна ємність, що має циліндричну форму. Вона обладнана порожниною, що оточує схильні до сильного нагріву елементи (водяною сорочкою), а також мішалкою, відкидною кришкою з електричним блокуванням стану кришки, термометром опору системою автоматичної стабілізації температури води в сорочці.

Виконуватися процес темперування пралінової маси може як в ручному, так і в програмному режимі за допомогою різноманітних датчиків, приладів та органів управління циркуляцією води в системі для здійснення термостабілізації при різних режимах темперування.

Для завантаження вихідної шоколадної маси призначена спеціальна відкидна кришка, а вивантаження вже відтеперованої маси здійснюється за допомогою розвантажувального пристрою або через спеціальний зливний пристрій із керованою засувкою.

Коли чергова порція шоколадної маси завантажена, автоматично включається мішалка. Одночасно в порожнину водяної сорочки починає подаватися вода спеціальної, задалегідь заданої температури відповідно до режиму роботи.

Операції змішування та темперування тривають до того часу, поки шоколадно-пралінова маса не отримає необхідну для глазурування та формування температуру і в'язкість.

В машинах темперування безперервної дії, як правило, реалізуються різні технологічні схеми підтримки або зміни температури у відповідності з ходом технологічного процесу, які можуть відрізнятися вимогами до продуктивності маси, розмірів установок, характерними особливостями формування різноманітних шоколадних виробів (різними начинками, різними формами фігур тощо).

Від вірного вибору та налаштування регуляторів, що використовуються в автоматизованих системах керування, залежить якість протікання технологічного процесу.

В наш час для регулювання температури багатьох технологічних об'єктів використовують системи, котрі працюють за принципами двопозиційного регулювання, системи, що використовують пропорційно-інтегрально-диференційні (ПІД) регулятори, а також регулятори, які працюють на основі нечіткої логіки.

При використанні двопозиційного регулювання рівень і точність підтримки заданої температури залежить від двох основних чинників: точності виміру температури (похибки терморпарі, терморезистора, пірометра і так далі) та граничної комутаційної здатності виконавчого елемента системи регулювання температури (контактора, магнітного пускача або тиристорного регулятора напруги).

Контакторна апаратура, як відомо, має нижчу граничну комутаційну здатність у порівнянні її з напівпровідниковими системами керування. Таким чином, при використанні контакторної апаратури головним параметром, що вплине на точність регулювання температури, буде гранична комутаційна здатність апаратів, а для напівпровідникових систем регулювання напруги – основним параметром стане точність виміру температури засобами вимірів.

Для плавного регулювання напруги, яка підводиться до електронагрівачів, використовуються ТРН (тиристорні регулятори напруги).

Від налаштування такого регулятора, разом з точністю вимірювання температури, залежить точність підтримки температури на рівні, що задається. Але для побудови такого регулятора необхідно розробити адекватну математичну модель.

Для побудови моделі використовують статистичний метод, що дає змогу використовувати експериментальні дані для різних режимів роботи обладнання. Виникає проблема в тому, що вимірювання деяких параметрів процесу може бути складним або неможливим. Це може суттєво вплинути на адекватність отриманої моделі.

Методи чисельної інтеграції та диференціювання вхідних сигналів застосовують класичні ПІД регулятори для формування сигналу керування.

У випадку нестационарності параметрів технологічних об'єктів у регуляторів з фіксованою структурою немає можливості якісного формування сигналу управління.

В таких умовах формування сигналу стає можливим лише при використанні адаптивних систем управління, або регуляторів, що працюють на основі теорії нечітких величин.

Адаптивні системи керування організують здебільшого з розробленням та використанням еталонної моделі об'єкту управління. Регулятори з наочною логікою для керування процесами застосовують експертні знання, які базуються на особливостях регульованого процесу, таким чином для настройки регулятора достатньо знати основні принципи та особливості регулювання основних параметрів об'єкту управління.

На рис. 1 представлена структурна схема системи регулювання температури теплообмінника теперуючої машини на основі нечіткої логіки.

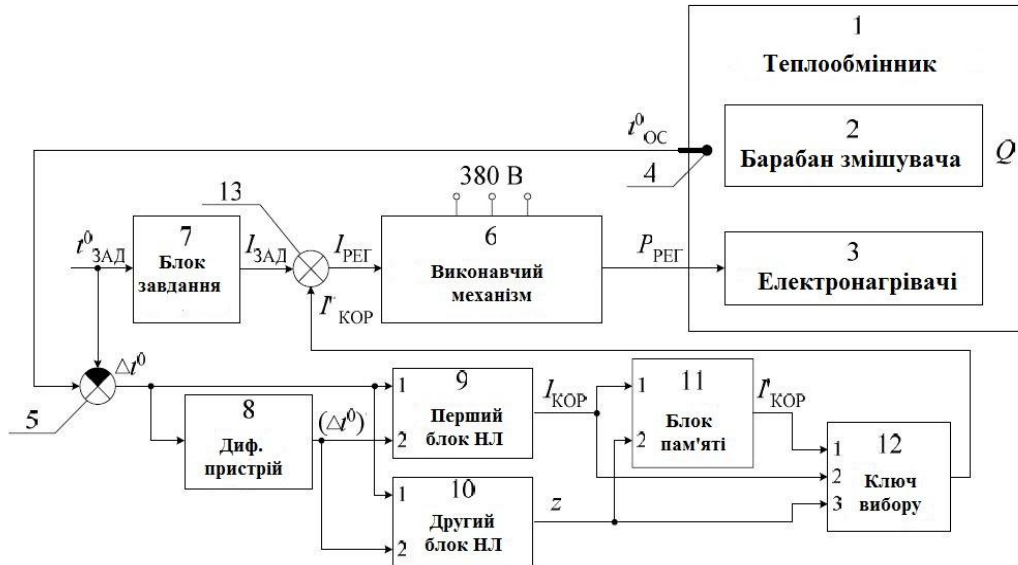


Рис. 1. Структурна схема системи нечіткого регулювання температури

Система регулювання функціонує таким чином: сигнали значення температури від часу, які сформовані зовнішнім задавальним пристроєм, надходять на вхід блоку завдання 7, відбувається розігрівання теплообмінника теперуючої машини без технологічної сировини, контур системи управління є розімкненим.

При цьому сигнал завдання $I_{Зад}$ у виконавчому механізмі 6 апроксимується виразом:

$$I_{Зад} = k_1 \cdot t_{Зад0} + k_2 \cdot t_{Зад},$$

де k_1, k_2 – масштабуючі коефіцієнти; $t_{Зад0}$ – температура довкілля; $t_{Зад}$ – температура завдання.

Задана температура також поступає на вхід блоку 5. Відповідно до приведеного вище виразу блок 7 формує сигнал завдання $I_{Зад}$, що поступає на суматор 13. Температура в теплообмінникові вимірюється термопарою 4 і сигнал зворотного зв'язку $t_{ЗЗ}$ поступає на блок 5, в якому обчислюється значення сигналу розузгодження Δt^0 поточної температури t^0 із заданим значенням $t^0_{Зад}$. Сигнал Δt^0 надходить на вхід блоку 8, а також на входи блоків 9 і 10. У диференціальному пристрої 8 відбувається обчислення швидкості (Δt^0) зміни значень розузгодження поточної температури Δt^0 . Цей сигнал (Δt^0) надходить на інші входи блоків 9 і 10.

Обчислюються значення розузгодження Δt^0 , потім у блоці 9 відбувається перетворення їх в нечіткі сигнали: "мале негативне 1" (М.Н.1), "мале негативне 2" (М.Н.2), "велике негативне 1" (В.Н.1), "велике негативне 2" (В.Н.2), "мале позитивне 1"

(М.П.1), "мале позитивне 2" (М.П.2), "велике позитивне 1" (В.П.1), "велике позитивне 2" (В.П.2), (рис. 2), з різною мірою належності μ .

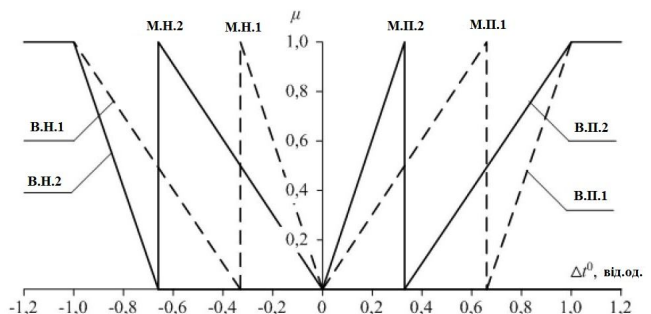


Рис. 2. Графіки функції перетворення значення розузгодження поточної температури у першому блоці нечіткої логіки

В цьому блоці також відбувається перетворення швидкості зміни розузгодження (Δt^0) в залежності від величини чисельного значення в нечіткі сигнали: "негативна" (Нег.) і "позитивна" (Поз.) з різною мірою належності μ (рис. 3).

Перший блок нечіткої логіки присвоює сигналу корекції збурення $I_{КОР}$ одне з наступних нечітких значень:

- "великий позитивний" (В.П.),
- "середній позитивний" (С.П.),
- "малий позитивний" (М.П.),
- "малий негативний" (М.Н.),
- "середній негативний" (С.Н.),
- "великий негативний" (В.Н.) (табл. 1).

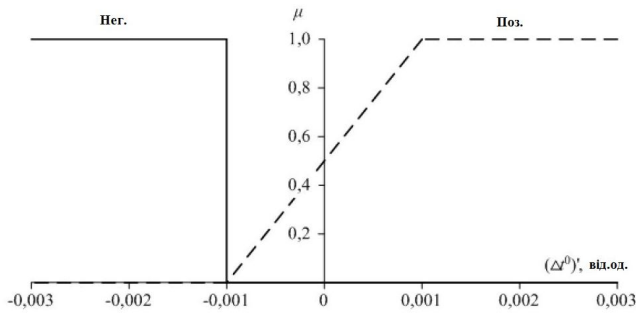


Рис. 3. Графіки функції перетворення швидкості зміни значення розузгодження у першому блоці нечіткої логіки

Далі отримане нечітке значення поточного сигналу корекції збурення $I_{КОР}$ в першому блоці нечіт-

кої логіки перетвориться в чисельне значення (рис. 4) залежно від міри належності μ . Поточний сигнал корекції збурення надходить на входи блоку пам'яті 11 та ключа вибору 12.

В блоці 10 відбувається перетворення сигналу розузгодження Δt^0 в нечіткі сигнали:

- "негативне" (Нег.),
- "негативне нульове" (Н.Н.),
- "позитивне нульове" (П.Н.),
- "позитивне" (П.), з різною мірою належності μ

(рис. 5).

Другий блок нечіткої логіки відповідає за перетворення швидкості зміни розузгодження $(\Delta t^0)'$ залежно від чисельного значення цієї величини в нечіткі сигнали: "негативне" (Нег.) і "позитивне" (Поз.), з різною мірою належності μ (рис. 6).

Таблиця 1 – База знань, що формується у першому блоці нечіткої логіки для отримання сигналу корекції

		Δt^0							
		В.П.1.	М.Н.1.	В.Н.1.	М.Н.1.	В.П.2.	М.П.2.	В.Н.2.	М.Н.2.
$(\Delta t^0)'$	Нег.	С.П.	М.П.	В.Н.	С.Н.	-	-	-	-
	Поз.	-	-	-	-	В.П.	С.П.	С.Н.	М.Н.

Таблиця 2 – База знань, що формується у другому блоці нечіткої логіки для отримання вихідного сигналу

		Δt^0							
		Поз.	П.Н.	Н.Н.	Нег.	Поз.	П.Н.	Н.Н.	Нег.
$(\Delta t^0)'$	Нег.	Кор.	Зап.	Кор.	Кор.	-	-	-	-
	Поз.	-	-	-	-	Кор.	Кор.	Зап.	Кор.

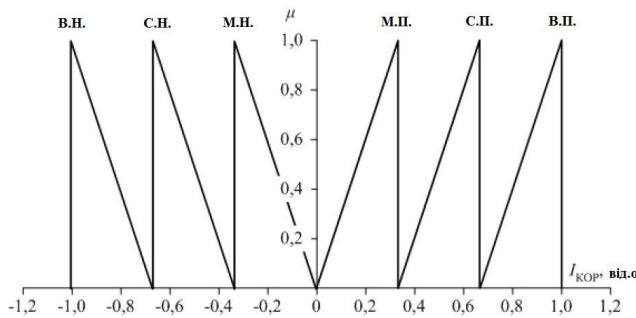


Рис.4. Графіки функції перетворення сигналу корекції у першому блоці нечіткої логіки

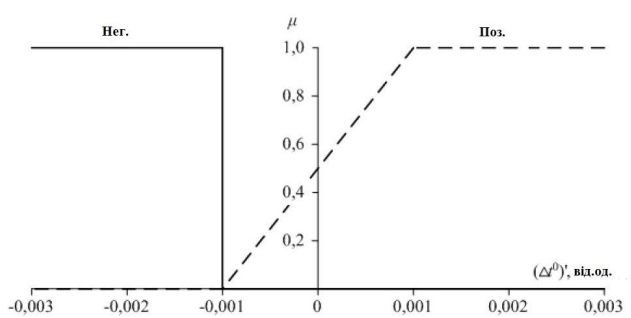


Рис. 6. Графіки функції перетворення швидкості зміни значення розузгодження в другому блоці нечіткої логіки

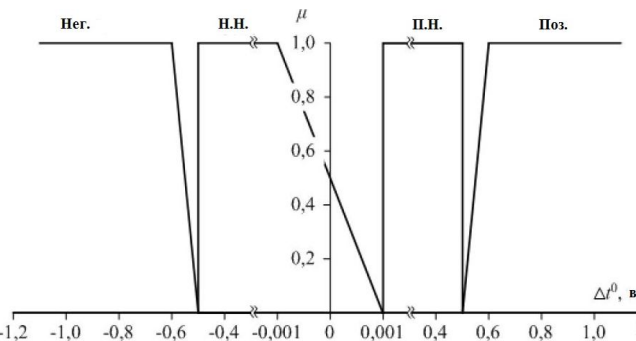


Рис. 5. Графіки функції перетворення значення розузгодження поточної температури у другому блоці нечіткої логіки

Другий блок нечіткої логіки використовує отримані міри приналежності нечітких значень Δt^0 і $(\Delta t^0)'$ згідно з базою знань (табл. 2).

Відбувається присвоєння вихідному сигналу з або значення "корекція" (Кор.), або "запам'ятовування" (Зап.).

Потім це нечітке значення вихідного сигналу перетворюється в числове значення (рис. 7) залежно від міри належності μ .

Отриманий сигнал з надходить на другий вхід блоку пам'яті 11 і на третій вхід ключа вибору 12.

Потім поточне значення сигналу $I_{КОР}$ у залежності від зміни величини сигналу з запам'ятовується у блоці пам'яті.

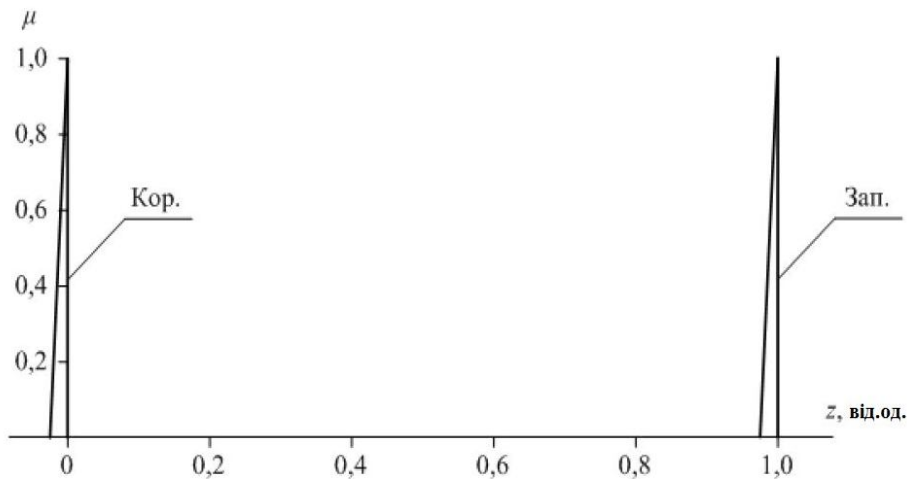


Рис. 7. Графіки функції перетворення сигналу корекції у другому блоці нечіткої логіки

На перший вхід ключа вибору 12 надходить з блоку 11 вихідний сигнал $I'_{КОР}$. Блок 12 в залежності від величини сигналу z присвоює вихідному сигналу $I'_{КОР}$ значення $I_{КОР}$ або $I'_{КОР}$.

Тоді цей вихідний сигнал $I'_{КОР}$ ключа вибору 12 надходить на суматор 13, в якому відбувається формування сигналу завдання виконавчому механізму 6 згідно з виразом:

$$I_{УПР} = I_{ЗАД} + I'_{КОР}.$$

Виконавчий механізм почне плавно змінювати кількість електричної енергії $P_{РЕГ}$, яка надходить до електронагрівачів 3.

Електрична енергія перетворюється в теплову, яка нагріває барабан змішувача 2. Таким чином відбувається підтримка заданої температури в теплообмінникові (блок 1).

Дана система регулювання температури, побудована на основі теорії нечітких величин, була апро-

бована на імітаційній моделі в середовищі MATLAB.

Також було проведено моделювання двопозиційного та ПІД-регулятора.

Для порівняльного аналізу приведені графіки підтримки заданої температури t в теплообмінникові з існуючою системою регулювання температури, що використовує двопозиційний регулятор, системи з ПІД-регулятором та з нечітким регулятором (рис. 8).

В результаті проведеного аналізу виявилось, запропонована авторами система, що працює на основі нечіткої логіки і реалізує систему автоматичного керування температури в теплообмінникові темперуючої машини, дає можливість вдосконалити протікання процесу і підвищити точність підтримки заданої температури відносно двопозиційного регулювання на 0,98% і 1,3% для пропорційно-інтегрально-диференційного регулятора.

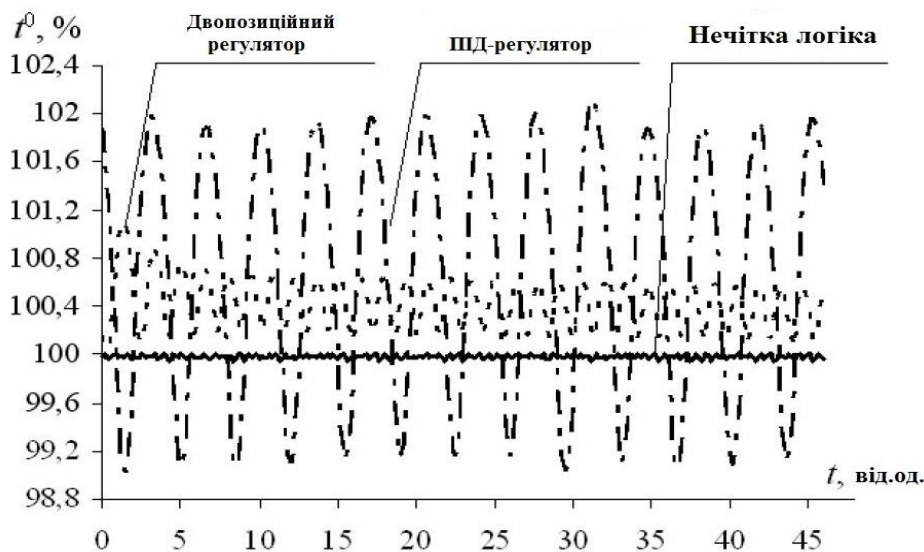


Рис. 8. Порівняння систем регулювання температури

Висновки

1. Проведені дослідження показали, що двопозиційний регулятор є найгіршим з трьох представлених, тому що має погані характеристики регулювання, значні відхилення регульованої температури, а також швидкий вихід з ладу виконавчого елемента.

2. Пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор, робота якого базується на методах чисельної інтеграції та диференціюванні вхідного сигналу, показав кращі характеристики, до того ж Пропор-

ційно-інтегрально-диференціальний регулятор є дуже простим в налаштуванні.

3. Найкращим являється регулятор температури на основі нечіткої логіки, який показав найвищу точність підтримки температури, але в той же час він є складнішим в налаштуванні у порівнянні з ПІД-регулятором.

4. Проведені розрахунки показали, що незважаючи на певні недоліки, регулятор температури на основі нечіткої логіки забезпечить економію енергоресурсів на 2,39 і 3,68 % у порівнянні з двопозиційним та ПІД-регулятором.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Драгилев А.И., Сезанаев Я.М. Оборудование для производства сахарных кондитерских изделий: Учебное пособие / А.И. Драгилев, Я.М.Сенаев. – М.: ИРПО; Изд. центр «Академия», 2000. – 272 с.
2. Соколов В.И. Автоматизация технологических процессов пищевых производств / В.И. Соколов. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1991. – 420 с.
3. Драгилев А.И., Хамидулин Ф.М. Технологическое оборудование кондитерского производства: Учебное пособие / А.И. Драгилев, Ф.М. Хамидулин. – СПб.: Троицкий мост, 2011. – 360 с.
4. Корячкина С. Я. Технология мучных кондитерских изделий: Учебник / С. Я. Корячкина, Т. В. Матвеева. – СПб.: Троицкий мост, 2011. — 400 с.: ил.
5. Благовещенская М.М., Воронина Н.О. Автоматика и автоматизация пищевых производств: Учебное пособие / М.М. Благовещенская, Н.О. Воронина и др. – М.: Агропромиздат, 1991 – 239 с.
6. Н.В.Єрмілова, Д.О. Рубан. Вибір регуляторів в системах автоматичного керування процесами в теплообмінниках темперуючих машин / Єрмілова Н.В., Рубан Д.О. // Збірник наукових праць за матеріалами V Всеукраїнської науково-практичної Інтернет-конференції «Електронні та мехатронні системи: теорія інновації, практика». (Полтава, 8 листопада 2019 р.) – Полтава: ПолтНТУ, 2019, С.65-69.
7. Малахов А.П. Элементы систем автоматики и автоматизированного электропривода: учеб.-метод. пособие А.П. Малахов, А.П. Усачов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 106 с.
8. Гахов Р.П. Моделирование трафика беспроводной сети передачи данных / Р. П. Гахов, Н. Г. Кучук// Научные ведомости БелГУ. – 2014. – № 1 (172). – Вып. 29(1). – С. 175-181.
9. Кучук Н.Г., Гавриленко С.Ю., Лукова-Чуйко Н.В., Собчук В.В. Перерозподіл інформаційних потоків у гіперконвергентній системі / С.Ю. Гавриленко. *Сучасні інформаційні системи*. 2019. Т. 3, № 2. С. 116-121. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.2.20>
10. Nechausov A., Mamusuć I., Kuchuk N. Synthesis of the air pollution level control system on the basis of hyperconvergent infrastructures. *Сучасні інформаційні системи*. 2017. Т. 1, № 2. С. 21 – 26. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2017.2.04>
11. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А. В. Леоненков. – Петербург, 2003. – 736 с.

Received (Надійшла) 12.10.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 11.11.2020

Automatic regulation systems of parameters in heat exchangers of tempering machines

N. Yermilova, S. Kyslytsia

Abstract. After analyzing the level of automation of modern confectionery equipment, the authors came to the conclusion that confectioneries mostly use separate ready-made automated complexes and production lines, which are built on local automation tools that control the process in accordance with clearly defined regulations of each technological operation external disturbances that affect the quality of the products. The **purpose** of the work is to study the process of temperature change in the tempering chamber of the automated system of making chocolates and to ensure the required temperature of the praline mass; comparison of temperature control methods, determination of the best control method. The authors found that nowadays the temperature regimes of many technological objects are controlled by systems that use two-position control, proportional-integral-differential (PID) regulators, as well as regulators that operate on the basis of fuzzy logic. The **results** of comparative analysis of maintaining the set temperature in the heat exchanger of the tempering machine with the existing temperature control system using a two-position regulator, a simulated system with a PID-regulator, and using a system with a fuzzy regulator. It was **concluded** that the two-position regulator is the worst of the three presented because it has significant fluctuations in the control temperature and rapid failure of the actuator. The PID-regulator has the best characteristics, which uses the methods of numerical integration and differentiation of the input signal and, thus, improves the temperature control characteristic, in addition, the PID-regulator is very easy to set up. The best is a temperature regulator based on fuzzy logic, which showed the highest accuracy of temperature maintenance, but at the same time it is more difficult to adjust, which significantly loses to the PID-regulator. Calculations have shown that despite certain shortcomings, the temperature regulator based on fuzzy logic will save energy by 2.39 and 3.68% compared to the two-position and PID-regulator.

Keywords: control system, heat exchanger, regulator, tempering, mathematical model.