

СКРИПНИК ВЯЧЕСЛАВ

Полтавський державний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0001-8883-7398>e-mail: viacheslav.skrypnyk@pdau.edu.ua**БИЧКОВ ЯРОСЛАВ**

Полтавський державний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0001-7559-127X>e-mail: yaroslav.bychkov@pdau.edu.ua**МОЛЧАНОВА НАТАЛІЯ**

Полтавський університет економіки і торгівлі

<https://orcid.org/0000-0002-0040-9952>e-mail: nemonn@ukr.net**ПОНОМАРЕНКО БОГДАН**

Полтавський державний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0002-4047-1881>e-mail: bohdan.ponomarenko@pdau.edu.ua

РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ НАГРІВАЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ АПАРАТА ДЛЯ КОНДУКТИВНОГО СУШІННЯ М'ЯСА

У статті наведені результати розробки системи автоматичного регулювання температури нагрівальних поверхонь апарата для кондуктивного сушіння м'яса. Було обґрунтовано розробку експериментального стенду для проведення низки досліджень з визначення оптимальних параметрів процесу кондуктивного сушіння, зокрема температури нагрівальних поверхонь, тривалості сушіння та інших. Розглянуто технічні можливості та емпіричним шляхом виявлено невідповідності базової комплектації апарата кондуктивного сушіння м'яса на основі двостороннього гриля «Frosty SP-1A3» для використання у експериментальному стенді. Встановлено, що температура верхньої та нижньої поверхонь нагрівання відрізняється від заданої у різному ступені, але таке значення відхилення неприпустимо. Визначено необхідність доопрацювання системи автоматичного регулювання температури експериментального стенду для кондуктивного сушіння м'яса.

Визначено склад елементів автоматизації та поставлено основні вимоги до системи автоматичного регулювання температури нагрівальних поверхонь. Розглянуто переваги використання Proportional-Integral-Derivative (PID) регулювання температури в інерційних системах. Вирішено завдання з розробки електричної принципової схеми та складу її елементів для забезпечення роботи системи автоматичного регулювання температури. Проведено конструктивне доопрацювання двостороннього гриля «Frosty SP-1A3» з встановлення двох роздільних датчиків температури Pt100 у нагрівальні поверхні. Проведено двоетапну адаптацію та налаштування PID-коефіцієнтів терморегулятора «ТРЦ-02 Універсал плюс». Для підвищення достовірності отриманих результатів використано інтерфейс RS-485 для зв'язку з комп'ютером із застосуванням програмного забезпечення «Промприлад».

За результатами проведених досліджень було розроблено систему автоматичного регулювання температури нагрівальних поверхонь з використанням PID-регулювання, що має достатню швидкодію та надійність для забезпечення ефективної роботи апарата для кондуктивного сушіння м'яса у складі експериментального стенду.

Ключові слова: система автоматичного регулювання, PID-регулювання, кондуктивне сушіння.

SKRYPNYK VIACHESLAV, BYCHKOV YAROSLAV, PONOMARENKO BOGDAN

Poltava State Agrarian University

MOLCHANOVA NATALYA

Poltava University of Economics and Trade

DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR AUTOMATIC TEMPERATURE CONTROL OF THE HEATING SURFACES OF THE APPARATUS FOR CONDUCTIVE DRYING OF MEAT

The article presents the results of the development of a system for automatic temperature control of the heating surfaces of the apparatus for conductive drying of meat. The development of an experimental stand for conducting a number of studies to determine the optimal parameters of the conductive drying process, in particular the temperature of the heating surfaces, the duration of drying, and others, has been substantiated. The technical capabilities have been considered and discrepancies in the basic configuration of the conductive meat drying device based on the double-sided grill "Frosty SP-1A3" for using in the experimental stand have been empirically identified. It has been established that the temperature of the upper and lower heating surfaces differs from the specified one to varying degrees, but such a deviation value is unacceptable. The need to improve the automatic temperature control system of the experimental stand for conductive meat drying has been determined. The composition of automation elements has been defined and the main requirements for the automatic temperature control system of heating surfaces have been determined. The advantages of using Proportional-Integral-Derivative (PID) temperature control in inertial systems have been considered. The tasks of developing an electrical circuit diagram and its elements composition to ensure the operation of the automatic temperature control system have been solved. The design modification of the double-sided grill "Frosty SP-1A3" was carried out by installing two Pt100 temperature sensors in the heating surface. A two-stage adaptation and adjustment of the PID coefficients of the "TRC-02 Universal Plus" thermostat was performed. To increase the reliability of the results obtained, the RS-485 interface was used for communication with a computer using the "Prompribor" software.

Based on the results of the conducted research, a system for automatic regulation of the temperature of heating surfaces using PID control has been developed; characterized by sufficient speed and reliability it ensures the efficient operation of the apparatus for conductive drying of meat as part of the experimental stand.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Проблема збереження харчових продуктів сільськогосподарського походження від псування і їхньої харчової цінності при зберіганні набуває все більшої актуальності у сьогодишніх умовах. Тому розробка нового обладнання і технологій для виробництва харчових продуктів з подовженим чи тривалим терміном зберігання є однією з пріоритетних задач сучасної переробної промисловості. Найбільш історично традиційним і поширеним способом зневоднення продуктів харчування є використання гарячого повітря як сушильного середовища, проте для інтенсифікації процесу варто розробляти нові комбіновані технології сушіння.

М'ясо має значну харчову цінність та високу вартість. Розробка технологій та створення обладнання для переробки м'яса у готовий продукт з подовженим або тривалим терміном зберігання без охолодження чи інших додаткових умов на сьогодні є актуальною науковою задачею.

Аналіз досліджень та публікацій

Кондуктивне сушіння м'яса – це процес видалення вологи з м'яса за допомогою теплоти, яка передається через прямий контакт із нагрівальною поверхнею. Цей процес є складним тепломасообмінним процесом, який може бути використаний як основний для подовження терміну придатності до споживання різних харчових продуктів, в тому числі і м'яса [1, 2].

Водночас, на сьогоднішній день кондуктивне сушіння досліджено недостатньо. У попередній роботі авторів наведено аналітичне обґрунтування кінетики вологовмісту суміщено із теоретичною кінетикою температури [3]. Наступним етапом є проведення низки досліджень з визначення оптимальних параметрів процесу кондуктивного сушіння, зокрема температури нагрівальних поверхонь, тривалості сушіння та інших. Для їх проведення постала необхідність розробки експериментального стенду для дослідження процесу кондуктивного сушіння м'яса. Однією з основних вимог до стенду було забезпечення температурних режимів процесу кондуктивного сушіння у межах 403 К.

Формулювання цілей статті

Мета роботи – розробка системи автоматичного регулювання температури експериментального стенду для дослідження процесу кондуктивного сушіння м'яса.

Виклад основного матеріалу

Основою експериментального стенду став електричний контактний гриль моделі «Frosty SP-1A3» потужністю 1,8 кВт/год з напругою живлення 220 В від джерела змінного струму. Діапазон температур нагрівальних поверхонь складає 278...573 К. Корпус гриля виконаний із нержавіючої сталі, нагрівальні поверхні гладкі і виготовлені із чавуну. Дослідний зразок розміщувався на нижню нагрівальну поверхню і притискався верхньою. Механізм притискання був додатково оснащений пружиною для фіксації верхньої плити гриля, що дозволяло виставляти необхідну відстань між нагрівальними поверхнями у відповідності до товщини оброблюваного продукту. Верхня і нижня чавунні поверхні нагріваються шляхом теплопередачі від нагрітого, відповідно, верхнього і нижнього ТЕНів, які паралельно з'єднані із джерелом змінного струму. Для запобігання електричного ураження оператора металеві частини корпусу гриля заземлені.

До початкового складу стенду також увійшли пристрої вимірювання та реєстрації зміни споживання електроенергії та параметрів електричної мережі і два термоелектричні термометри. Електричні параметри контролювались «розумним» однофазним енергомонітором-лічильником «Smart MAIC D101». Енергомонітор-лічильник обладнаний кільцевим трансформатором струму з внутрішнім діаметром 0,015 м, зовнішнім діаметром 0,032 м, що монтується на фазний провід. Власна споживана потужність монітору 1,2 Вт. Часовий інтервал оновлення даних 5 с, часовий інтервал фіксації даних 60 с. Пристрій здійснює передачу даних на хмарний сервер для подальшої обробки та візуалізації, зв'язок із пристроєм здійснювався по протоколу бездротового Wi-Fi зв'язку 2,4 ГГц/IEEE 802.11.

Температура поверхонь 403 К встановлювалась за допомогою манометричного терморегулятора серії AG16-K-300K, передбаченого конструкцією гриля. Температурні характеристики нагрівальних поверхонь знімалися за допомогою мультимірювальних пристроїв ELPRIV M 4580/1Ц з паспортним значенням допустимої абсолютної похибки вимірювання в інтервалі температур 233...423 К $\pm(0,01a+3$, де a – вимірювана величина) з використанням термопар К-типу TP-01A (TXA). Термопари контактним способом розміщувались на обох поверхнях між чавунними плитами та продуктом. Температура фіксувалась з інтервалом у 5 с. Результати вимірювань наведено на рис. 1.

Як видно з рис. 1, температура верхньої та нижньої поверхонь нагрівання відрізняється від заданої у різному ступені, але таке значення відхилення неприпустимо. Це пояснюється конструктивними особливостями грилю «Frosty SP-1A3».

По-перше, чутливий елемент манометричного терморегулятора AG16-K-300K встановлений впритул до нижнього ТЕНу, що спричиняє його нагрівання значно швидше за нижню чавунну поверхню. Через це фактична температура нижньої поверхні менша за встановлену на терморегуляторі.

По-друге, верхня і нижня чавунні поверхні конструктивно мають різну товщину, що компенсувалось заводом-виробником через встановлення у нижню поверхню ТЕНу потужністю 800 Вт,

а у верхню – 1000 Вт. Це у свою чергу призвело до фактичного перегрівання верхньої поверхні у процесі обробки м'яса.

У зв'язку з цим було прийняте рішення про конструктивне доопрацювання експериментального стенду з введенням роздільного керування температурою верхньої і нижньої чавунних поверхонь.

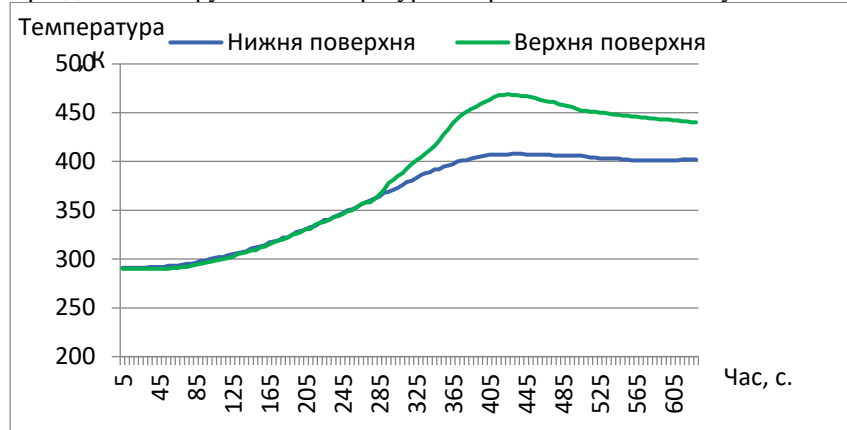


Рис. 1. Кінетика температури нагрівальних поверхонь

Серед різних способів автоматичного регулювання, «proportional–integral–derivative» (PID) регулювання заслуговує на особливу увагу. PID-регулятори є невід'ємною частиною сучасних систем управління. Вони широко використовуються у різних галузях промисловості, робототехніці, автомобільній промисловості, авіації, хімічній промисловості, енергетиці, системах опалення, вентиляції та кондиціонування повітря тощо. Основна причина популярності PID-регуляторів полягає в їх простоті, універсальності та здатності забезпечувати стабільне та точне управління різними системами [4].

PID регулювання використовується в електроніці та комунікаціях для забезпечення стабільної роботи систем та точного керування різними параметрами. У таких застосуваннях PID контролери забезпечують підтримання сигналу на заданому рівні, знижують шум і компенсують непередбачувані збурення у системах [5].

PID є аббревіатурою від трьох складових контролера:

P (Пропорційна) складова відповідає за миттєвий відгук системи на відхилення від заданого значення. Вона пропорційна величині помилки (різниці між заданим і фактичним значенням). Чим більша помилка, тим більший вплив має пропорційна складова;

I (Інтегральна) складова усуває залишкову помилку, яка може залишитись навіть при наявності пропорційної дії. Вона сумує помилки за певний часовий проміжок, що допомагає досягти точності у довгостроковій перспективі;

D (Диференційна) складова прогнозує майбутні зусилля на основі швидкості зміни помилки. Вона своєчасно реагує на зміни, що допомагає знизити коливання системи.

Разом ці три складові дозволяють системі більш точно і швидко реагувати на відхилення, покращуючи її стабільність і продуктивність [4-6].

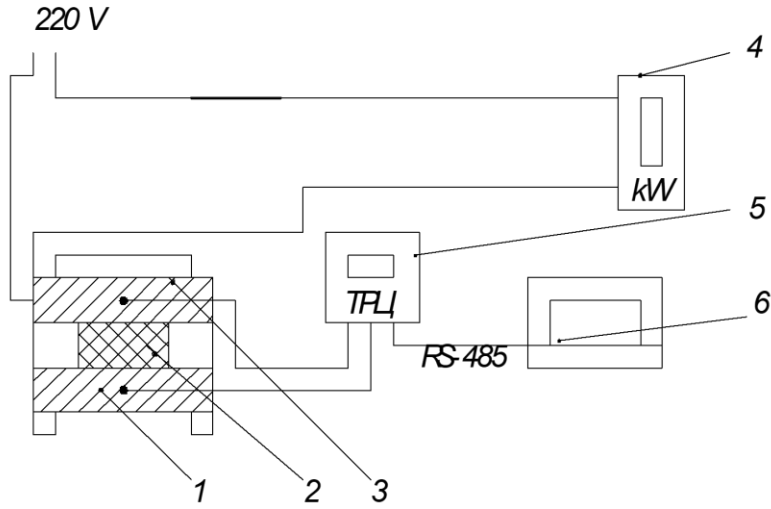
Для успішної реалізації конструктивного доопрацювання експериментального стенду необхідно знайти оптимальне рішення трьох основних питань.

Перше полягало у виборі автоматичного PID регулятора. Поставленій задачі повністю відповідав прилад вітчизняного виробництва для вимірювання і регулювання температури «ТРЦ-02 Універсал плюс». Прилад «ТРЦ-02 Універсал плюс» призначений для перетворення і обробки вхідних сигналів від термоперетворювачів опорів типу ТСП або ТСМ за ДСТУ 2858, термоелектричних перетворювачів типу ТХК, ТХА, ТПП за ДСТУ 2857, датчиків з уніфікованими вихідними характеристиками 0...5 мА, 0...20 мА, 4...20 мА з можливістю передачі та реєстрації даних на комп'ютері через адаптер RS-485 або EIA-485. Конструкція приладу дозволяє використовувати одночасно два канали, що забезпечує роздільне регулювання температури верхньої та нижньої поверхні гриля. Чутливими елементами було вибрано датчики температури Pt100 завдяки їх ударостійкості та водонепроникності. Діаметр датчиків становить 0,004 м, довжина 0,03 м, діапазон робочих температур $T = 253...723$ К, номінальний опір 100 Ом при $T = 273,15$ К. що дає змогу розмістити їх всередині чавунних плит максимально наближено до робочої поверхні у точці, що відповідає геометричному центру кожної із поверхонь.

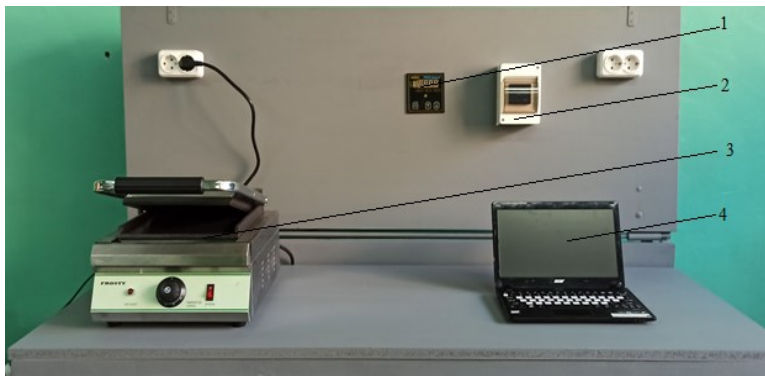
На основі прийнятих рішень створено схему експериментального стенду, що показано на рисунку 2.

На основі розробленої схеми був виготовлений експериментальний стенд для проведення досліджень, наведений на рис. 3.

Друге питання полягало у принциповій відмінності режимів роботи елементів автоматизації при класичному регулюванні за верхнім та нижнім рівнем заданої величини та PID регулюванням. Останнє за своїм змістом фактично є ШІМ-регулюванням і створює імпульсні сигнали різної тривалості, що у разі збільшує кількість вмикань-вимикань робочого органу (ТЕНу). Класичний спосіб використання контактних засобів автоматизації (електромагнітних реле та пускачів) у даному випадку недоцільний.



1 – Нижня нагрівальна поверхня; 2 – оброблюваний продукт; 3 – верхня нагрівальна поверхня;
4 – енергомонітор-лічильник «Smart MAIC D101»; 5 – ТРЦ-02 Універсал плюс; 6 – персональний комп'ютер.
Рис.2. Схема експериментального стенду з дослідження кондуктивного сушіння м'яса



1 – ТРЦ-02 Універсал плюс; 2 – монітор-лічильник «Smart-maic D101»;
3 – контактний гриль «Frosty SP-1A3»; 4 – комп'ютер для реєстрації даних.
Рис. 3. Загальний вигляд стенду для кондуктивного сушіння м'яса

Було запропоновано використання безконтактних електронних пристроїв комунікації на основі симетричних триодних тиристорів (симісторів або триаків) [7]. За основу було взято силовий симістор BT137 та розроблено електричну принципову схему керування ТЕНами апарата для кондуктивного сушіння м'яса (рис. 4).

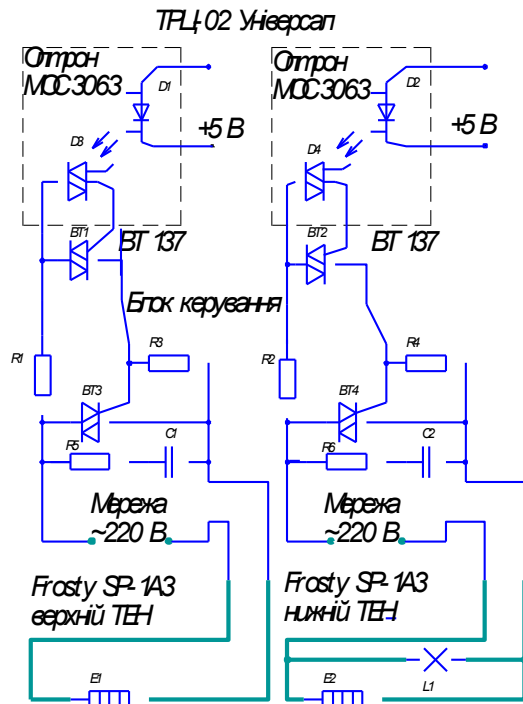


Рис. 4. Схема електрична принципова блоку керування ТЕНами апарата для кондуктивного сушіння м'яса

Схема містить оптрон МОС 3063 та його складові D1...D4, симістор ВТ 137 (ВТ1, ВТ2), силові симістори ВТА16–600 (ВТ3, ВТ4), резистори R1, R2 (380 Ом), R3, R4 (330 Ом), R5, R6 (39 Ом), конденсатори C1, C2 (JFB-0,01/630V, 0,01 мФ), ТЕН верхньої нагрівальної поверхні E1 (1000 Вт), ТЕН нижньої нагрівальної поверхні E2 (800 Вт), лампу сигналізації живлення нижнього ТЕНа L1 (PL1-101, 220V AC).

Третє питання полягало у визначенні коефіцієнтів PID регулювання, які б забезпечували максимальну відповідність заданій температурі з диференціалом ≤ 10 К.

Пропорційна складова PID-регулювання формує сигнали управління елементам для досягнення необхідного значення, у нашому випадку – температури $T = 403$ К. Інтегральна складова формує сигнали управління елементам, виробляючи коливання значень поблизу встановленого показника, доки температура не стане стабільною. Диференційна складова формує сигнал, що змінює швидкість системи нагрівання при наближенні до встановленого значення. У загальному вигляді формула виглядає наступним чином [5, 8]:

$$u(t) = P + I + D = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de}{dt} \quad (1)$$

$u(t)$ – керуючий дія;

K_p – коефіцієнт пропорційної складової;

$e(t)$ – похибка керування між заданим та отриманим значенням;

K_i – коефіцієнт інтегральної складової;

$e(\tau)d\tau$ – похибка керування між заданим та отриманим значенням із врахуванням часу;

K_d – коефіцієнт диференційної складової.

Способи встановлення PID коефіцієнтів містять як теоретичні так і емпіричні методи [5, 8, 9, 10]. Технічно ці складові мають числові значення коефіцієнтів у загальному налаштуванні апарату ТРЦ 02 та рекомендуються заводом-виробником для різних систем. Для об'єктів з малою тепловою інерцією: $K_p = 0,7$, $K_i = 230$; $K_d = 10$. Для об'єктів із середньою інерцією (термопластавтомати, екструдери та ін.): $K_p = 3$, $K_i = 600$; $K_d = 20$. Для об'єктів з високою інерцією (грилі, печі, сушильні шафи): $K_p = 7$, $K_i = 1500$; $K_d = 30$.

Для моделювання процесу замість м'яса використовували пластину з кремній-органічного матеріалу (харчовий силікон ТУ У600 152 135 028 – 96) з допустимою температурою використання до 553 К, відповідно до умов проведення експериментальних досліджень за високих температур нагрівальних плит. Дослідний зразок неправильної форми був виготовлений з пластини харчового силікону товщиною 0,005 м.

У базовому функціоналі «ТРЦ-02 Універсал плюс» є можливість автоматичного визначення PID коефіцієнтів для спрощення налаштування регулятора під кожний окремий випадок. Однак таке налаштування також містить похибки і передбачає подальше калібрування.

Модельний зразок розмістили між поверхнями нагрівання, увімкнули функцію автоматичного налаштування PID-коефіцієнтів. Після завершення налаштування прилад автоматично задав значення пропорційного ($K_p = 35$), інтегрального ($K_i = 600$) і диференційного ($K_d = 150$) коефіцієнтів, які мали б забезпечити стабільний температурний режим. Значення PID-коефіцієнтів, встановлених автоматичним налаштуванням, зафіксували і протестували стосовно підтримання температури нагрівальних поверхонь у межах $T = 403$ К із диференціалом ≤ 10 К. Проте, автоматичне налаштування не забезпечило необхідного диференціалу.

Для подальшого калібрування було застосовано емпіричний метод налаштування PID-коефіцієнтів. Модельний зразок розмістили між поверхнями нагрівання та спостерігали за коливаннями температури впродовж 3 повних циклів, за яких температура досягала мінімального та максимального значення, а також фіксували час, за який температура стабілізувалася. Розподілена система управління була реалізована в SCADA-системі «Промприлад», виконавчі симісторні модулі якої забезпечили функціонування системи в реальному часі. В якості каналів передачі даних використовувався інтерфейс асинхронного послідовного зв'язку RS-485. В процесі налаштування вносили зміни значень PID-коефіцієнтів в разі значних відхилень. Проводили повторне тестування системи, спостерігаючи за температурою на протязі 3 циклів, фіксуючи результати. Продовжували коригування коефіцієнтів до виходу на необхідне значення диференціалу. Оптимальному диференціалу температури відповідали налаштування коефіцієнтів $K_p = 15$, $K_i = 800$; $K_d = 200$.

Програмне забезпечення «Промприлад» через інтерфейс RS-485 дає можливість знімати щосекунди показання датчиків температури та інтерпретувати їх у вигляді графіку та у числовому форматі документу Microsoft Excel. Загальний вигляд кривої розгону у програмному забезпеченні «Промприлад» показано на рис.5.

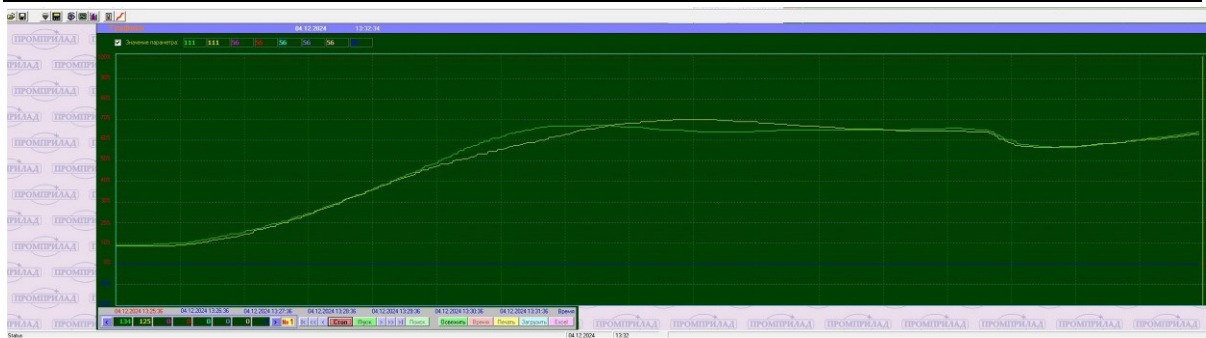


Рис.5. Загальний вигляд кривої розгону у програмному забезпеченні «Промприлад»

Використовуючи отримані оптимальні значення коефіцієнтів було проведено серію експериментів з перевірки точності та надійності роботи системи автоматичного регулювання. З цією метою, після виходу на стаціонарний режим без навантаження, у систему вносили збурення, тобто розміщували модульний зразок та спостерігали за реакцією системи автоматичного регулювання температури. Отримані результати кінетики температури нагрівальних поверхонь наведено на рис. 6.

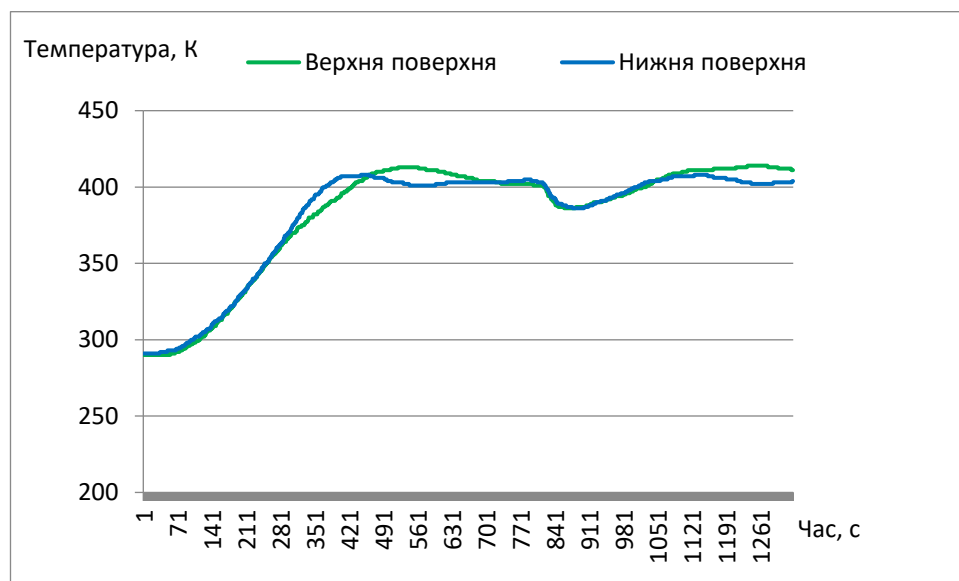


Рис.6. Кінетика температури нагрівальних поверхонь з використанням PID-регулювання

Як видно з рис. 6, криві розгону верхньої та нижньої нагрівальних поверхонь у незначній мірі відрізняються на відрізок часу від початку до 701-ї секунди через різну потужність ТЕНів. З 701-ї до 841-ї секунди спостерігається стабільна температура стаціонарного режиму. Після 841-ї секунди між нагрівальними поверхнями розміщували модельний зразок, що призвело до падіння температури з послідовною стабілізацією у межах заданого диференціалу ≤ 10 К.

Висновки з даного дослідження

У результаті досліджень обґрунтовано розробку експериментального стенду для визначення оптимальних параметрів процесу кондуктивного сушіння м'яса. Вирішено завдання з розробки електричної принципової схеми та складу її елементів для забезпечення роботи системи автоматичного регулювання температури. Проведено двоетапну адаптацію та налаштування PID-коефіцієнтів терморегулятора «ТРЦ-02 Універсал плюс». Розроблено систему автоматичного керування ТЕНами апарата для кондуктивного сушіння м'яса, яка має достатню швидкодію та надійність для забезпечення ефективної роботи нагрівальних поверхонь.

Література

1. Вольвач, Т. С., Савойський, О. Ю., & Сіренко, Ю. В. (2024). Способи сушіння продуктів харчування: переваги, недоліки та тенденції розвитку [Електронний ресурс]. *Вісник Сумського національного аграрного університету: науковий журнал. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів»*, 2(56), 21–26. <https://doi.org/10.32782/msnau.2024.2.3>
2. Сабадаш, С. М., & Савченко-Перерва, М. Ю. (2017). Аналіз сучасних способів сушіння рослинної сировини та існуючі конструкції сушильного устаткування [Електронний ресурс]. *Вісник Сумського національного аграрного університету: науковий журнал. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів»*, 10(32), 134–137.

3. Скрипник, В. О., & Пономаренко, Б. Г. (2024). Аналітичне обґрунтування процесу кондуктивного сушіння м'яса. *Вісник Сумського національного аграрного університету: науковий журнал. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів»*, 2(56), 79–85. <https://doi.org/10.32782/msnau.2024.2.11>
4. Shamsuzzoha, M., & Lloyds Raja, G. (Eds.). (2023). *PID Control for Linear and Nonlinear Industrial Processes*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.100749>
5. Лорія, М. Г., Поркуян, О. В., Ананьєв, М. В., & Целіщев, О. Б. (2019). *Оптимальні настроювання регуляторів промислових систем управління технологічними об'єктами: монографія* (під ред. М. Г. Лорія). Сєвєродонецьк: Вид-во СХУ ім. В. Даля.
6. Memon, F., & Shao, C. (2020). An optimal approach to online tuning method for PID type iterative learning control. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 18, 1926–1935. <https://doi.org/10.1007/s12555-018-0840-0>
7. Patin, N., & Multon, B. (2014). *Electronique de puissance pour l'industrie et les transports 1: Méthodologie de synthèse de convertisseurs et technologie des composants*. Great Britain: ISTE Editions.
8. Ang, K. H., Chong, G., & Li, Y. (2005). PID control system analysis, design, and technology. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 13(4), 559–576.
9. Гарасимів, В. М. (2020). Алгоритм налаштування коефіцієнтів ПІД-регулятора із використанням методів нечіткої логіки. *Методи та прилади контролю якості*, 2(45), 102–108.
10. Жученко, А. І., & Путятін, Р. О. (2022). Метод налаштування ПІД-регулятора за заданим розташуванням полюсів системи керування. *Вісник НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського». Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження*, (4), 50–64. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.4.2022.269779>

References

1. Volvach, T. S., Savoiskyi, O. Y., & Sirenko, Y. V. METHODS OF DRYING FOOD PRODUCTS: ADVANTAGES, DISADVANTAGES AND DEVELOPMENT TRENDS. *Bulletin of Sumy National Agrarian University. The Series: Mechanization and Automation of Production Processes*, (2 (56)), P. 21–26. <https://doi.org/10.32782/msnau.2024.2.3>
2. Sabadash S. M. Analiz suchasnykh sposobiv sushynnia roslynnoi syrovyny ta isnuyuchi konstruktzii sushylnoho ustatkuvannia [Elektronnyi resurs] / S. M. Sabadash, M. Yu. Savchenko-Pererva // Visnyk Sums'koho natsionalnoho ahrarnoho universytetu : naukovyi zhurnal. Ser. «Mekhanizatsiia ta avtomatyzatsiia vyrobnychkykh protsesiv» / Sums'kyi natsionalnyi ahrarnyi universytet. Sumy : SNAU, 2017. Vyp. 10 (32). S. 134-137.
3. Skrypnyk, V. O., & Ponomarenko, B. G. ANALYTICAL JUSTIFICATION OF THE CONDUCTIVE DRYING PROCESS OF MEAT. *Bulletin of Sumy National Agrarian University. The Series: Mechanization and Automation of Production Processes*, (2 (56)), P. 79–85. <https://doi.org/10.32782/msnau.2024.2.11>
4. M. Shamsuzzoha and G. Lloyds Raja, Eds., PID Control for Linear and Nonlinear Industrial Processes. IntechOpen, May 17, 2023. doi: 10.5772/intechopen.100749.
5. Loria, M. H., Porkuiian, O. V., Ananiev, M. V., & Tselishchev O. B. (2019). Optymalni nastroiuvannia rehulatoriv promyslovykh system upravlinnia tekhnolohichnymy obiektyamy [Optimal tuning of controllers for industrial process control systems]. SNU im. V. Dalia, Sievierodonetsk. 192 p. (in Ukrainian)
6. Memon, F., Shao, C. An Optimal Approach to Online Tuning Method for PID Type Iterative Learning Control. *Int. J. Control Autom. Syst.* 18, 1926–1935. 2020. <https://doi.org/10.1007/s12555-018-0840-0>
7. Patin, Nicolas., Multon, Bernard. *Electronique de puissance pour l'industrie et les transports 1: Méthodologie de synthèse de convertisseurs et technologie des composants*. Great Britain: ISTE Editions, 2014.
8. Ang K. H. PID control system analysis, design, and technology. / K. H. Ang, G. Chong, Y. Li // IEEE Transactions on Control Systems Technology, July 2005. vol.13 (4) P. 559-576.
9. Harasymiv V. M. Alhorytm nalashtuvannia koeffitsientiv PID-rehulatora iz vykorystanniam metodiv nechitkoi lohiky / V. M. Harasymiv // Metody ta prylady kontroliu yakosti. 2020. № 2 (45). S. 102-108.
10. Zhuchenko A. I., Putiatin R. O. Metod nalashtuvannia PID-rehulatora za zadanym rozstasuvanniam poliusiv systemy keruvannia. *Visnyk NTUU «KPI imeni Ihoria Sikorskoho». Seriya: Khimichna inzheneriia, ekolohiia ta resursozberezhennia*. 2022. № 4. S. 50-64.