

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра «Автоматизації виробничих процесів»

«Допущено до захисту»

Зав. кафедри АВП

к.т.н., доцент

_____ Олександр ДІДИК

« ____ » _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти

на тему

**«Система автоматичного регулювання температурного
режиму автоклава ШКС-128-500»**

Виконав здобувач III курсу групи АК-22мб
ОПП «Автоматизація та комп'ютерно-
інтегровані технології»

спеціальності 151 «Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології»

_____ Ігор СЕНЕНЬКИЙ

« ____ » _____ 2025 р.

Керівник роботи

доцент, канд.техн.наук

_____ Маріанна ФЕДОТОВА

« ____ » _____ 2025 р.

Рецензент

_____ Іван САВЕЛЕНКО

« ____ » _____ 2025 р.

м. Кропивницький – 2025 рік

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра автоматизації виробничих процесів
Рівень вищої освіти бакалавр
Галузь знань 15 Автоматизація та приладобудування
Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
Освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Дідик О.К.

« 03 » лютого 2025 року

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Сененького Ігора Дмитровича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Система автоматичного регулювання температурного режиму автоклава ПКС-128-500
2. Керівник роботи Федотова Маріанна Олександрівна, канд. техн. наук
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
3. Строк подання здобувачем роботи до захисту 31.05.2025 р.
4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи Розробити систему автоматичного керування температурним режимом автоклава ПКС-128-500. Провести огляд технології виготовлення консервованих м'ясопродуктів; Розробити структурну схему системи автоматичного керування, вибір та аналіз її елементів; Проектування системи автоматичного керування; Практична реалізація системи автоматичної регулювання.
5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Огляд технології виготовлення консервованих м'ясопродуктів</i>	<i>15.04.24</i>	
2.	<i>Розробка структурної схеми системи автоматичного регулювання</i>	<i>30.04.24</i>	
3.	<i>Проектування системи автоматичного регулювання температурного режиму автоклава</i>	<i>15.05.24</i>	
4.	<i>Практична реалізація системи автоматичного регулювання</i>	<i>25.05.24</i>	

Дата видачі завдання 03.02.2025 р.

Керівник роботи _____ М.О. Федотова « 03 » лютого 2025 р.

Завдання прийнято до виконання

Здобувач _____ І.Д. Сененький « 03 » лютого 2025 р.

Анотація

на кваліфікаційну роботу здобувача групи АК-22мб Сененького Ігора Дмитровича зі спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» на тему: «Система автоматичного регулювання температурного режиму автоклава ШКС-128-500».

Кваліфікаційну роботу присвячено проблемі підвищення якості виготовлення консервованих м'ясопродуктів. Підвищення якості досягається за рахунок точного витримування режимів відповідно до формули стерилізації. Досягти даного результату дає можливість застосування оптимальної системи автоматичного регулювання температурного режиму автоклава.

В роботі розглянуті технології виготовлення консервованих м'ясопродуктів, проаналізовані методи консервування та теоретичні основи стерилізації. Проведений аналіз об'єкту керування та технологічного процесу стерилізації, на основі яких визначені задачі автоматизації. Обрані елементи системи автоматичного регулювання та розроблена структурна схема системи. Проведений синтез оптимального регулятора САР температурного режиму та виконане моделювання роботи системи. На основі даних моделювання визначено, що перерегулювання в режимі стерилізації становить менше ніж 0,4 °С, а в подальшому відхилення не перевищує 0,04 °С; система автоматичного регулювання дала можливість зменшити вплив зовнішніх збурень більше ніж в 100 раз.

На основі одержаних результатів розроблена принципова схема мікропроцесорної системи автоматичного регулювання температурного режиму автоклава ШКС-128-500.

Ключові слова: автоклав, регулювання температури, режими стерилізації, оптимальний регулятор.

Summary

on final qualification work of the student of group AK-22mb Senenkyi Ihor on a speciality 151 «Automation and computer-integrated technologies» on the theme: «Automatic temperature control system for the IPKS-128-500 autoclave».

The qualification work is devoted to the problem of improving the quality of canned meat products. Quality improvement is achieved by accurately maintaining the regimes in accordance with the sterilization formula. This result can be achieved by using the optimal system of automatic temperature control of the autoclave.

The work considers the technologies of canned meat products manufacturing, analyzes preservation methods and theoretical foundations of sterilization. The control object and the sterilization process are analyzed, on the basis of which the automation tasks are determined. The elements of the automatic control system are selected and the structural diagram of the system is developed. The synthesis of the optimal temperature controller ATS is carried out and the system operation is simulated. Based on the modeling data, it is determined that the overregulation in the sterilization mode is less than 0.4 °C, and in the future the deviation does not exceed 0.04 °C; the automatic control system made it possible to reduce the influence of external disturbances by more than 100 times.

Based on the results obtained, a schematic diagram of a microprocessor system for automatic temperature control of the IPKS-128-500 autoclave was developed.

Keywords: autoclave, temperature control, sterilization modes, optimal regulator.

Зміст

Вступ.....	2
1 Аналіз технології виробництва консервованих м'ясних продуктів.....	4
1.1 Технології консервування м'ясних продуктів.....	4
1.2 Теоретичні основи стерилізації.....	11
2 Розробка структурної схеми системи автоматичного регулювання.....	25
2.1 Дослідження об'єкту керування.....	25
2.2 Аналіз технологічного процесу стерилізації та визначення задач автоматизації.....	29
2.3 Вибір датчика та виконавчих механізмів для САР.....	32
2.4 Структурна схема системи автоматичного регулювання температурного режиму автоклава.....	36
3 Проектування системи автоматичного регулювання температурного режиму автоклава.....	38
3.1 Вибір методу синтезу регулятора.....	38
3.2 Синтез регулятора.....	45
3.3 Моделювання роботи САР температурного режиму автоклава.....	48
4 Практична реалізація системи автоматичного регулювання.....	55
4.1 Обчислення Z-перетворення передатної функції регулятора.....	55
4.2 Опис принципової схеми регулятора.....	57
Висновки.....	66
Список літератури.....	67

Вступ

Актуальність теми. Теплова стерилізація в автоклавах залишається найбільш поширеним і ефективним методом консервування продуктів харчування. Процес теплової стерилізації є критично важливим у виробництві консервів, оскільки від точності його виконання залежить тривалість зберігання продукту, його якість, харчова цінність та економічна ефективність самого процесу. Невірно проведена стерилізація може призвести до того, що не всі шкідливі мікроорганізми будуть знищені, або, навпаки, викликати значне пошкодження корисних харчових компонентів продукту. Тому, при виготовленні консервів, необхідно дотримуватися режимів стерилізації, які гарантують безпеку продукту для споживання протягом встановленого терміну зберігання, а також зберігають його корисні властивості.

Система автоматичного регулювання температури автоклава повинна підтримувати задану температуру відповідно до формули стерилізації. Це завдання є досить складним через значну інерційність об'єкта регулювання та вплив зовнішніх збурень на систему. Для ефективного вирішення цієї проблеми пропонується застосування методів синтезу оптимального регулятора, що ґрунтуються на сучасній теорії управління.

Метою дослідження є покращення якості стерилізації в автоклавах шляхом розробки системи автоматичного регулювання температурного режиму з використанням алгоритмів сучасної теорії управління.

Для досягнення мети дослідження були визначені та вирішені такі завдання:

- провести аналіз об'єкта управління та визначити його динамічні характеристики;
- розробити структурну схему системи автоматичного управління;
- здійснити синтез оптимального регулятора температурного режиму автоклава;

- провести аналіз якості системи автоматичного управління температурним режимом автоклава.

Об'єктом дослідження є методи та алгоритми для покращення керування температурним режимом автоклава.

Предметом дослідження є система автоматичного керування температурним режимом автоклава.

Методи дослідження ґрунтуються на сучасних методах теорії управління, математичній статистиці, теорії випадкових функцій та спектральному аналізу. Для оцінки якості системи автоматичного керування температурним режимом автоклава та перевірки ефективності запропонованих методів використовувалося імітаційне моделювання.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що визначені структура та параметри оптимального регулятора дають можливість інженеру-конструктору отримувати рішення задач без необхідності виконання аналогічних розрахунків.

1 Аналіз технології виробництва консервованих м'ясних продуктів

1.1 Технології консервування м'ясних продуктів

Основною причиною псування харчових продуктів є вплив мікроорганізмів, які потрапляють на них з навколишнього середовища. Внаслідок їхньої життєдіяльності відбувається розклад складних біологічних сполук на більш прості хімічні речовини, що часто мають неприємний запах і смак.

Псування харчових продуктів може також бути спричинене біохімічними (ферментативними) процесами, властивими самим продуктам. Цей тип псування називається ферментативним. Отже, проблема зберігання харчових продуктів здебільшого полягає в регулюванні біохімічних процесів, які є основою псування. Змінюючи умови середовища та впливаючи на мікроорганізми за допомогою різних фізико-хімічних факторів, можна контролювати склад і активність мікрофлори в продукті, а також характер перебігу ферментативних процесів.

З біологічної точки зору методи зберігання (консервування) харчових продуктів можна поділити на кілька груп:

- Методи, засновані на принципі біозу — підтримка життєвих процесів у продуктах і використання природного імунітету живих організмів (наприклад, предзабійне утримання худоби або птахів).

- Методи, засновані на принципі анабіозу — пригнічення життєдіяльності мікроорганізмів і ферментативних процесів в самих продуктах (наприклад, консервування холодом, посол, сушіння), при високому осмотичному тиску.

- Методи, засновані на принципі ценоанабіозу — зміна складу мікрофлори продукту за допомогою різних зовнішніх впливів (наприклад, квашення, в процесі якого розвиваються молочнокислі бактерії, що утворюють молочну кислоту).

- Методи, засновані на принципі абіозу — повне припинення життєдіяльності мікроорганізмів і ферментативних процесів в продукті. Це досягається шляхом впливу на продукти фізико-хімічними факторами (термостерилізація, застосування бактерицидних консервантів) або механічним відділенням продуктів від збудників псування (наприклад, ультрафільтрація).

Найбільше поширення здобули методи консервування м'ясних продуктів, які ґрунтуються на принципах анабіозу та абіозу. Тому далі будуть розглянуті способи консервування, такі як охолодження; обробка при високому осмотичному тиску (посол, сушіння); використання антисептиків; іонізуюче опромінення; а також нагрівання (струмами високої частоти, електромагнітними полями надвисоких частот, парою, водою, повітрям, пароповітряними сумішами).

Консервування за допомогою холоду

Консервування за допомогою холоду дозволяє значною мірою зберегти початкові властивості сировини під час тривалого зберігання. При заморожуванні та зберіганні м'ясної продукції припиняється розвиток мікрофлори, а деякі мікроорганізми навіть гинуть. Важливим фактором є кінцева температура заморожування, а швидкість цього процесу суттєво впливає на якість м'ясних виробів. Однак, метод консервування холодом має й недоліки, зокрема, необхідність забезпечення холоду на всіх етапах логістики. Крім того, низькі температури не призводять до повного знищення мікроорганізмів.

Консервування за високого осмотичного тиску

Для нормального розвитку мікроорганізмів необхідна наявність вільної води в продукті. Видалення цієї вологи призводить до припинення розвитку та загибелі частини мікроорганізмів. У цьому контексті посол і сушіння сприяють виведенню вільної вологи, змінюючи умови навколишнього середовища (підвищення осмотичного тиску, збільшення концентрації солі, що впливає на ферментативну активність бактерій). Використання

концентрованих розчинів солі для консервування м'яса та м'ясопродуктів має довгу історію в технології виробництва м'ясних виробів.

Консервуюча дія повареної солі полягає в підвищенні осмотичного тиску, що виникає при розчиненні солі в водній частині продукту. Гнильні бактерії, зокрема, чутливі до підвищення осмотичного тиску, і їхній ріст припиняється при концентрації солі 10-15 %. Хімічна активність цих бактерій також зменшується при більш низьких концентраціях. Проте, поварена сіль лише припиняє життєдіяльність бактерій, а не вбиває їх.

Сушіння має значну перевагу порівняно з іншими методами консервування, оскільки висушені продукти мають меншу масу та об'єм, зберігаючи при цьому живильні речовини. Це значно полегшує їхнє зберігання та транспортування.

Однак цей метод має й деякі недоліки: висушені м'ясопродукти часто потребують попереднього зволоження перед використанням; під час сушіння вивільняються ароматичні речовини; відбувається хімічна взаємодія компонентів продукту з киснем повітря; також можуть змінюватися властивості продукту через процес сушіння або підвищення температури.

Отже, як посол, так і сушіння м'ясних продуктів призводять до комплексних фізико-хімічних змін, що, в свою чергу, викликають органолептичні й структурно-механічні зміни, які знижують якість і харчову цінність продуктів. Глибина цих змін залежить від умов засолу, сушіння та тривалості зберігання консервованих виробів, але в будь-якому випадку продукт не стає стерильним. Крім того, зберігання таких консервованих м'ясопродуктів вимагає контролю параметрів навколишнього середовища, таких як температура, вологість і склад газового середовища.

Консервування антисептиками

Один із методів консервування харчових продуктів базується на використанні антисептиків — хімічних речовин, що пригнічують ріст або викликають загибель мікроорганізмів. В Україні для консервування дозволяється застосовувати деякі антисептики, такі як сірчиста, бензойна,

сорбінова й оцтова кислоти, а також етиловий спирт. Однак у м'ясній промисловості хімічні консерванти використовуються дуже рідко.

Консервування іонізуючим опроміненням

Одним із перспективних методів консервування харчових продуктів, який дозволяє організувати неперервний процес обробки м'ясопродуктів, у тому числі й консервів, і при цьому максимально зберегти їх харчову цінність та якість, є іонізуюче випромінювання (гамма-промені, катодні та рентгенівські промені), що мають сильну бактерицидну дію, не викликаючи значних змін у якості продукту.

На сьогодні важливими є гамма-промені (1020 Гц), які мають високу проникаючу здатність. При використанні іонізуючого випромінювання тривалість стерилізації зазвичай складає кілька десятків секунд. У цьому процесі тип упаковки не впливає на ефективність і тривалість стерилізації. Однак висока інтенсивність опромінення, особливо при обробці м'яса, може призвести до зміни якості сировини. Крім того, м'ясопродукти після опромінення не готові до кулінарної обробки, тому їх слід піддавати додатковому нагріванню.

Вплив іонізуючого випромінювання на продукт залежить від енергії випромінювання та дози опромінення (кількість енергії, яку поглинає речовина). Одна й та сама доза може бути досягнута при великій енергії випромінювання і коротшій тривалості опромінення або навпаки. Однак ефект від такого впливу буде різним, оскільки характер змін у продукті залежить від енергії випромінювання.

При використанні іонізуючого випромінювання радіоліз води спричиняє швидке відмирання мікроорганізмів у продуктах. Ступінь інактивації більше залежить від дози опромінення, ніж від потужності. Стійкість мікроорганізмів до опромінення визначається їхніми біологічними характеристиками та умовами навколишнього середовища. Наявність кисню та води, а також низький рН знижують стійкість мікроорганізмів, в той час як температура має незначний вплив на їхню стійкість.

Окрім переваг використання іонізуючого випромінювання, існують і суттєві недоліки: можливість виникнення небажаних хімічних змін, які погіршують якість продукту; ризик утворення шкідливих сполук під час і після опромінення; а також продовження ферментативних процесів при зберіганні готових виробів.

Повністю усунути небажані зміни поки не вдалося, тому на промисловому рівні іонізуюче випромінювання не використовується.

Консервування нагріванням

Найбільш поширеним методом консервування м'ясопродуктів є використання тепла. Цей метод дозволяє зберігати продукти високої якості і поживної цінності протягом тривалого часу, навіть за умов нерегульованої температури. До теплових методів відносяться консервування м'ясопродуктів за допомогою струму високої частоти, електромагнітного поля надвисоких частот, а також тепла, яке отримується від традиційних джерел нагрівання, таких як пар, вода, повітря чи пароповітряна суміш.

Стерилізація струмом високої частоти (СВЧ) полягає в нагріванні матеріалу за рахунок індукції вихрових струмів і коливальних рухів заряджених часток у електричному полі. Електрична енергія, яка поглинається, перетворюється в кінетичну енергію коливних молекул, що спричиняє підвищення температури оброблюваного зразка.

Ефект стерилізації м'ясних продуктів зумовлений не лише тепловим впливом на мікроорганізми, але й утворенням тепла в самих клітинах під дією СВЧ. Наразі цей метод використовують для стерилізації окремих видів плодкових консервів і соків. Наприклад, у банці об'ємом 1000 мл температура досягає 100 °С за 30-60 секунд рівномірно по всьому об'єму, при цьому фізико-хімічні та органолептичні властивості продукту практично не змінюються.

Використання СВЧ для стерилізації м'ясних консервів ускладнюється технічними проблемами, оскільки м'ясна продукція потребує більш суворих режимів стерилізації порівняно з плодовими консервами. Це вимагає

спеціального обладнання для створення зовнішнього протитиску, щоб уникнути пошкодження консервів. До того ж електрофізичні властивості м'яса варіюються залежно від складових (жирової, сполучної та м'язової тканин), що призводить до нерівномірного нагрівання (селективного) і різної швидкості знищення спор. Втім, стерилізація м'ясних консервів за допомогою СВЧ можлива в принципі.

Стерилізація в електромагнітному полі надвисоких частот (НВЧ) значно прискорює процес теплової обробки м'ясних продуктів, забезпечуючи отримання високоякісних і біологічно цінних виробів. Головною перевагою НВЧ-нагрівання є здатність поля швидко проникати глибоко в матеріал, створюючи рівномірний розподіл джерел тепла по всьому об'єму. Завдяки цьому мікроорганізми в продукті нагріваються практично миттєво, що сприяє їх швидшому знищенню.

Єдина теорія щодо механізму впливу НВЧ на мікрофлору поки відсутня. Виявлені генетичні та бактерицидні ефекти можуть бути зумовлені як прямою взаємодією НВЧ-поля зі структурами нуклеїнових кислот, так і впливом вторинного фактора — тепла, яке утворюється через діелектричні втрати в клітині. Це тепло може змінювати структуру та метаболізм основних біополімерів шляхом порушення енергетичного балансу. Вірогідно, обидва фактори впливають одночасно. Різниця у діелектричних і теплофізичних властивостях окремих елементів клітини може викликати утворення внутрішньоклітинних потенціалів — теплових, електричних, механічних або хімічних. Інтенсивність цих потенціалів і їхній вплив на метаболізм залежать від адаптаційних можливостей клітини та змін температури, викликаних зовнішнім впливом.

Аналізуючи окиснення жирової фракції, можна зазначити, що НВЧ-стерилізація активніше стимулює первинні процеси окиснення, тоді як стерилізація при 120 °С більше впливає на вторинні процеси. Як наслідок, у паштетах утворюється більше летких жирних кислот, ніж пероксидних сполук.

Стерилізація паром, водою, повітрям або пароповітряною сумішшю є широко поширеним методом обробки харчових продуктів. Герметично запакований продукт стерилізується за допомогою різного обладнання (ротаційного, статичного чи безперервної дії). У результаті отримують промислово стерильний і кулінарно готовий продукт.

Режим стерилізації визначається часом, необхідним для знищення мікроорганізмів у центральній частині банки. Тривалість процесу залежить від багатьох чинників: складу та кількості мікрофлори, рівня рН і типу продукту, розмірів і матеріалу тари, ступеня її заповнення, температури продукту, а також стану продукту під час стерилізації (у спокої чи русі). Температура стерилізації м'ясних консервів обирається залежно від виду продукту, його хімічного складу, а також розміру і форми тари.

Під час розрахунку формули стерилізації враховують такі положення:

- Спори починають гинути, коли температура в центрі продукту досягає близько 100 °С, і цей процес триває протягом усього періоду нагрівання до максимальної температури, її витримки та подальшого зниження до 100 °С.

- Кожній точці на температурній кривій прогріву центральної частини консервів відповідає своя швидкість загибелі спор.

- Загальний стерилізуючий ефект визначається як сума локальних ефектів, що досягаються на кожному етапі нагрівання й охолодження консервів.

Збільшення температури стерилізації скорочує загальну тривалість процесу, але водночас прискорює хімічні зміни в продукті. До того ж, можуть з'являтися хімічні зміни, які не виникають за нижчих температур. Тому для деяких видів м'ясних консервів (наприклад, шинки чи сосисок) існує оптимальна межа температури і часу стерилізації.

Популярність теплової стерилізації зумовлена її простотою, доступністю технічних засобів, низькими матеріальними витратами, а також

можливістю зберігати продукт протягом тривалого часу (понад 3 роки) без значних втрат у якості.

1.2 Теоретичні основи стерилізації

Для придушення життєдіяльності мікроорганізмів консерви зазвичай стерилізують при температурі понад 100 °С, використовуючи апарати як періодичної, так і безперервної дії. У разі використання автоклава періодичної дії (АВ-4) між наповненням банок і початком теплової обробки виникають паузи, що сприяють збільшенню кількості мікроорганізмів у сировині. Крім того, нерівномірний розподіл температури в таких автоклавах, зокрема в чотирьохкорзинчатих моделях, ускладнює досягнення однакової температури в банках, що знаходяться на різних рівнях. Це може призвести до мікробіологічних дефектів у консервах, оскільки в окремих зонах важко підтримати потрібний температурний режим.

У стерилізаторах безперервної дії ці проблеми усунуті. Застосування таких пристроїв дає змогу одразу після закупорки банок направляти їх на теплову обробку, забезпечуючи безперервний процес виробництва, що виключає ймовірність потрапляння на склад продукції, яка не була належним чином стерилізована.

У всіх випадках стерилізація має забезпечувати отримання стерильних або промислово-стерильних консервів. Стерильність консервів означає відсутність у готовому продукті життєздатних мікроорганізмів, тоді як промислова стерильність вказує на відсутність у готовому продукті мікроорганізмів, здатних розвиватися при встановлених температурах зберігання для даного виду консервів, а також на відсутність мікроорганізмів та токсинів, які можуть бути небезпечними для здоров'я людини. Розглядаючи зміни, що відбуваються в мікробній клітині під впливом тепла, можна зазначити, що, по-перше, здатність до розмноження втрачається через

денатурацію гена, а по-друге — через денатурацію дезоксирибонуклеїнової кислоти під впливом високих температур.

Здатність мікробної клітини зберігати репродуктивні властивості після нагрівання (термостійкість мікроорганізмів) залежить від кількох факторів. Споріві форми мікроорганізмів є більш стійкими до тепла порівняно з безспоривими та вегетативними формами. Спори можуть витримувати нагрівання до 100 °С протягом десятків і навіть сотень хвилин, тоді як вегетативні форми зазвичай втрачають життєздатність при температурі 60—80 °С за кілька хвилин. Це пов'язано з високим вмістом іонів кальцію в спорах, наявністю дипіколинової кислоти (яка не виявляється у вегетативних формах), а також зниженою вологістю.

Чим більша кількість мікроорганізмів у сировині, тим інтенсивнішим має бути тепловий вплив для їх знищення. Тому в консервному виробництві важливо підтримувати високу санітарну культуру та створювати умови, які сприяють зниженню мікробного забруднення сировини, інгредієнтів, тари та інших елементів процесу.

Термостійкість мікробної клітини визначається температурою нагрівання, активною кислотністю, вмістом мінеральних солей, жирів, білків, вуглеводів та інших компонентів середовища. Залежність загибелі спор від температури та тривалості її впливу наведена в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Відношення загибелі спор до температури та тривалості її впливу.

Мікроорганізм		Тривалість відмирання спор (у хв.) при температурі, °С					
		100	105	110	115	120	125
B.	subtilis	120	110	80	70	40	30
B.	mesentericus	110	110	75	60	40	25
C.	botulinum	300	95	70	45	24	12

Зміна значення рН у кисло або лужну сторону зменшує термостійкість бактерій та посилює процес денатурації білків під впливом тепла. Відомо, що 2,5%-вий розчин кухонної солі має захисний ефект при нагріванні мікрофлори. Невеликі концентрації солі сприяють осмотичному зневодненню мікробних клітин, що підвищує їх термостійкість. Однак при нагріванні в середовищі 2,5%-ного або вищого розчину хлористого натрію знижується стійкість мікроорганізмів, що пояснюється підсолюючим ефектом, який впливає на білки, посилюючи процес їх денатурації.

Збільшення термостійкості мікрофлори в середовищах, що містять жир, пояснюється його низькою здатністю проводити тепло порівняно з м'язовою тканиною, а також ефектом обволікання мікробної клітини жиром. Це призводить до зменшення зволоження оболонки клітини і, відповідно, зниження впливу тепла на мікроорганізми.

Закономірності теплової стерилізації консервів

Ефективність теплової стерилізації консервів у банках залежить від правильного вибору двох взаємопов'язаних параметрів: температури стерилізації, яка повинна забезпечити повне знищення не тільки вегетативних форм мікроорганізмів, але й їхніх спор, а також тривалості підтримки оптимальної температури протягом процесу.

За результатами кількох досліджень було встановлено, що температура, необхідна для знищення певного виду мікроорганізмів, змінюється в арифметичній прогресії, тоді як час, необхідний для їх знищення, змінюється в геометричній прогресії. Знаменник цієї геометричної прогресії можна математично виразити за допомогою формули

$$g = n-1 \sqrt{\frac{z}{a}}, \quad (1.1)$$

де g — знаменник прогресії; n — кількість членів прогресії; z — час, необхідний для знищення мікроорганізмів при більш високій температурі стерилізації; a — час, необхідний для знищення мікроорганізмів при нижчій температурі.

Якщо визначити емпірично температури стерилізації для не менше ніж двох випадків і час, що відповідає цим температурам, можна за допомогою формули (1.1) знайти знаменник прогресії та встановити час стерилізації при температурі, що є сусіднім членом арифметичної прогресії, за формулою

$$x = gz, \quad (1.2)$$

де x — час стерилізації, що потрібно визначити; g — знаменник геометричної прогресії; z — час, необхідний для знищення мікроорганізмів для попереднього етапу прогресії.

Перед стерилізацією продукт потрібно нагріти до температури стерилізації в середині банки. Швидкість проникнення тепла в банку, що визначається часом, необхідним для досягнення цієї температури в центрі банки, у загальному вигляді розраховується за допомогою формули

$$dv = \frac{dt}{dz}, \quad (1.3)$$

де dv — зміна швидкості; dt — зміна температури; dz — зміна часу, що відповідає зміні температури.

Фактори, які впливають на тривалість стерилізації

Час, необхідний для прогріву та стерилізації продукту, визначається рядом факторів, таких як початкова температура вмісту банки, розмір банки, матеріал і товщина її стінок, тип теплоносія, положення банки під час процесу прогріву та стерилізації, а також в'язкість, щільність і рН вмісту, характер і кількість мікроорганізмів.

Вплив початкової температури на швидкість прогріву є досить суттєвим, коли тепло передається вмісту банки лише через теплопередачу. Така ситуація виникає, коли консистенція вмісту банки дуже щільна або в'язка, що виключає можливість конвекційних струмів.

При підвищенні початкової температури банки швидкість проникнення тепла зменшується через зниження температурної різниці між теплоносієм і вмістом банки. Однак, оскільки кількість тепла, яке потрібно подати, також зменшується, час прогріву не збільшується, а навпаки — скорочується.

Дослідження кривих прогріву банок показало, що вони мають логарифмічну форму

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_n - \Delta t_k}{\ln \frac{\Delta t_n}{\Delta t_k}}, \quad (1.4)$$

де Δt_{cp} — середнє значення різниці температур між теплоносієм і вмістом банки за одиницю часу; Δt_n — різниця температур на початку прогріву; Δt_k — різниця температур в кінці прогріву.

Вплив розмірів і матеріалу банки на швидкість проникнення тепла полягає в тому, що з більшими розмірами банки для її стерилізації потрібно більше часу.

Для банок неправильної форми — таких як квадратні, трапецеїдальні, овальні тощо — найбільше тепло проникає до центру через ту поверхню, середня відстань до центру якої є найменшою.

Згідно з дослідженнями Н. Е. Федорова, тривалість прогрівання консервів одного виду при однакових умовах температурного режиму та різних значеннях $\frac{h}{r}$ (h (висота), r (радіус) і v (об'єм банки) можна визначити за допомогою відповідного співвідношення.

$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{F_{O1}}{F_{O2}} \left(\frac{h_2}{h_1} \cdot \frac{r_2}{r_1} \cdot \frac{v_1}{v_2} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad (1.5)$$

де z — тривалість; F_O — критерій Фур'є.

Якщо значення $\frac{h}{r}$ рівні, формула набуває наступного вигляду:

$$\frac{z_1}{z_2} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{\frac{2}{3}}. \quad (1.6)$$

Максимальна тривалість прогріву спостерігається, коли висота банки дорівнює її діаметру. Тривалість процесу значно зменшується при підвищенні температури нагрівального середовища, початкової температури консервів і зниженні кінцевої температури продукту.

Швидкість проникнення тепла до вмісту банки збільшується, коли матеріал тари має високу теплопровідність і поверхня тари тонша.

Кількість тепла, необхідного для нагрівання консервної банки, можна виразити таким чином:

$$Q = kF\Delta t, \quad (1.7)$$

де Q — загальна кількість тепла, що витрачається на нагрівання; k — загальний коефіцієнт теплопередачі; F — поверхня банки; Δt — різниця між кінцевою та початковою температурою вмісту банки.

Якщо кількість тепла визначити за одиницю часу, то швидкість проникнення тепла через одиницю поверхні можна виразити за допомогою такої формули

$$\frac{Q}{F} = k\Delta t. \quad (1.8)$$

При постійній різниці температур коли $\Delta t = \text{const}$, швидкість проникнення тепла пропорційна сумарному коефіцієнту теплопередачі k . Значення коефіцієнта теплопередачі, що визначається за формулою Пекле, залежить від матеріалу тари та товщини її стінок. Чим менший коефіцієнт теплопровідності матеріалу тари і чим товстіші стінки, тим менший буде коефіцієнт теплопередачі.

З матеріалів, що зазвичай використовуються для виготовлення консервних банок, скло має значно гірші теплопровідні властивості порівняно з жерстю. Коефіцієнт теплопровідності скла в середньому в 80 разів менший за коефіцієнт теплопровідності заліза.

Коефіцієнт теплопередачі також залежить від типу і властивостей теплоносія та продукту. Зазвичай для прогріву та стерилізації використовують пар, гаряче повітря або воду. Тепло передається вмісту банки через теплопровідність і конвекцію. Тому проникнення тепла в тістоподібні та напівтверді продукти, де відсутні або дуже слабкі конвекційні струми, відбувається повільніше. Теплопровідність скляних банок у

порівнянні з бляшаними значно знижується лише для продуктів з гарною конвекцією.

Положення банки під час стерилізації значно впливає на швидкість процесу. Якщо банка під час прогріву та стерилізації обертається або струшується, вміст банки переміщується, виникають конвекційні струми, що сприяє швидшому вирівнюванню температури. Процес прогріву та стерилізації в автоклавах з обертовими банками відбувається значно швидше, ніж в автоклавах, де банки залишаються нерухомими, особливо це помітно для консервів з рідкою консистенцією. На рис. 1.1 наведено графік, що демонструє вплив обертання банок на нагрівання консервів.

В'язкість консервів має значний вплив на швидкість прогріву вмісту банки. Серед речовин, які часто використовуються при виготовленні банкових консервів і впливають на їх в'язкість, цукор, сіль та інші кристалоїди в слабких розчинах не мають суттєвого впливу на швидкість проникнення тепла.

Хоча цукор у високих концентраціях змінює в'язкість продукту, під час стерилізації в'язкість цукрового сиропу значно зменшується. Водночас слід зазначити, що збільшення в'язкості та зниження теплопровідності через підвищення концентрації цукрового сиропу компенсується його шкідливим впливом на мікроорганізми, що робить їх менш стійкими до нагрівання. Тому вплив солі та цукру на тривалість стерилізації є настільки незначним, що ним можна знехтувати.

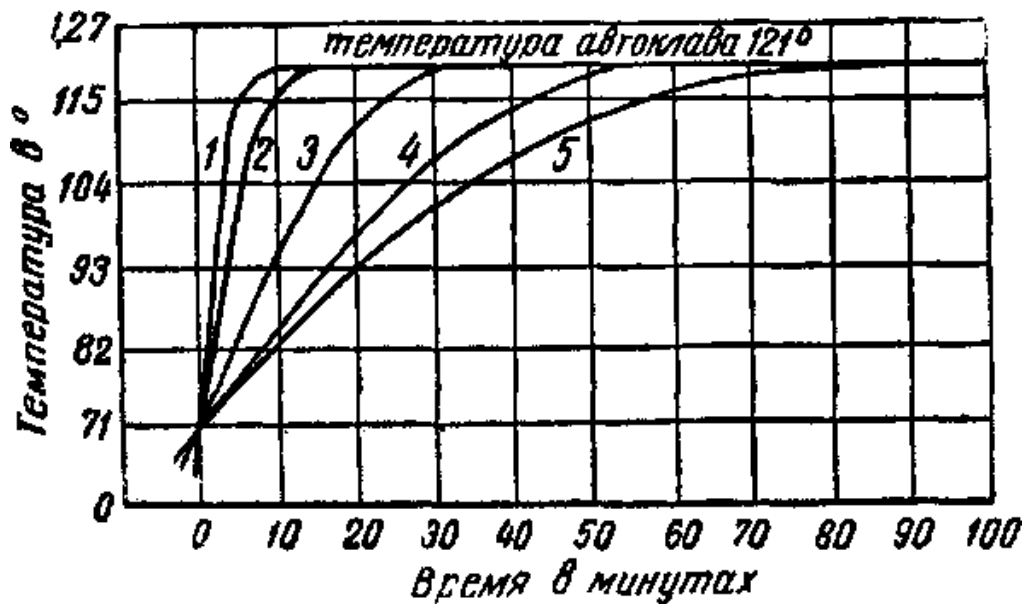


Рисунок 1.1 – Графік впливу обертання банок на процес прогріву консервів в автоклаві: 1 - швидкість обертання 104 об/хв; 2 - 66 об/хв; 3 - 42 об/хв; 4 - 26 об/хв; 5 - нерухома банка.

Колоїдні речовини проводять тепло повільніше. Так, дослідження впливу концентрації крохмалю на швидкість проникнення тепла в центр банки показали, що ця швидкість знижується пропорційно збільшенню концентрації крохмалю до 6%, а при подальшому підвищенні концентрації вона наближається до значень, що характерні для відсутності конвекційних струмів.

Щільність консервів є важливим фактором, що впливає на швидкість прогріву. З підвищенням щільності вмісту банки знижується його теплопровідність.

Щільність консервів залежить від вмісту сухих речовин у продукті та способу обробки сировини перед її заповненням у консервні банки. Ущільнення м'яса відбувається через попереднє варіння, що викликає денатурацію білків, а також через механічне ущільнення при закладці в банки.

Вплив активної кислотності середовища, що визначається концентрацією водневих іонів (рН), на тривалість стерилізації був

розглянутий раніше. Залежно від значення рН продукти поділяються на чотири основні групи: висококіслі (рН 3,7 і нижче), кіслі (рН від 3,7 до 4,5), напівкіслі (рН від 4,5 до 6) і некіслі (рН вище 6).

Для низькокіслотних і кіслих продуктів важливу роль у розвитку анаеробних мікроорганізмів відіграє гнильна група, серед яких особливу увагу заслуговує патогенний організм *Clostridium botulinum*. Гнильні анаероби можуть спричиняти псування продуктів із рН від 5 до 4,5 без утворення газів.

У більшості продуктів під час стерилізації рН знижується через утворення вуглекислого газу, сірководню та інших кислотних сполук, що виникають внаслідок окиснення цукрів і осадження буферних речовин, таких як білки і фосфати. Дослідження показали, що для м'яса рН під час стерилізації майже не змінюється.

Кількість мікроорганізмів, що присутні в консервах на початку стерилізації, має значний вплив на її швидкість. Дослідження показали, що вибір режиму стерилізації залежить не лише від термостійкості мікроорганізмів, але й від їх концентрації. Тобто, чим більше спор в продукті, тим більше часу потрібно для їхнього знищення, і швидкість їх руйнування (кількість спор, що гинуть за одиницю часу) зростає.

Було встановлено, що процес стерилізації слідує логарифмічному закону, згідно з яким концентрація живих мікроорганізмів зменшується пропорційно логарифму часу. Швидкість стерилізації на певному етапі є пропорційною кількості ще живих мікроорганізмів. Цю закономірність можна описати за допомогою формули

$$k = \frac{1}{z} \lg \frac{B}{b}, \quad (1.9)$$

де k — коефіцієнт швидкості знищення мікроорганізмів; z — проміжок часу між двома вимірюваннями; B — кількість мікроорганізмів на початку проміжку часу; b — кількість мікроорганізмів наприкінці цього проміжку часу.

Ця залежність підкреслює важливість дотримання належного санітарно-гігієнічного режиму на всіх етапах виробництва консервів. Чим менше мікроорганізмів міститься в продукті до стерилізації, тим ефективніше і швидше відбуватиметься процес стерилізації.

Основною причиною псування консервів є порушення герметичності банок. На герметичність банки впливає різниця між тиском, що встановлюється під час стерилізації всередині банки, та зовнішнім тиском. Тиск всередині банки є сумою парціальних тисків парів води, повітря, газів, що виділяються з продукту, та самого продукту під час нагрівання, і може бути виражений за допомогою відповідної формули.

$$P = p_1 + p_2 + p_3 + p_4, \quad (1.10)$$

де P — загальний тиск у банці під час стерилізації; p_1 — тиск пари води; p_2 — тиск повітря; p_3 — тиск газів, що утворюються в результаті розкладу продукту; p_4 — тиск продукту при нагріванні.

Тиск водяних парів визначається лише температурою стерилізації, оскільки є парціальним тиском однієї з компонент газової суміші.

Тиск повітря залежить від температури закачування, температури стерилізації та наявності вільних просторів у банці. Чим вища температура консервів під час закачування, тим більше повітря видаляється, і тим менший тиск повітря в банці. Водночас, чим вища температура стерилізації, тим більший тиск повітря. Якщо в банці залишається більше вільного простору, то вміст повітря збільшується, що призводить до підвищення тиску.

Тиск газів, що виділяються з продукту, залежить від властивостей самого продукту, що стерилізується. На утворення газоподібних речовин впливають як процеси переробки сировини до стерилізації, так і коректність проведення процесу стерилізації. Якщо на етапі підготовки сировини відбувалися глибокі ферментативні процеси чи псування, то в процесі стерилізації інтенсивніше виділятимуться газоподібні продукти розпаду. Аналогічне явище може статися при неправильному режимі стерилізації. Накопичення газоподібних речовин призводить до збільшення їх об'єму і

тиску під час нагрівання. Тиск продукту також залежить від його кількості та змін об'єму при підвищенні температури. З підвищенням температури об'єм деяких продуктів, таких як бобові та крупи, збільшується, тоді як у м'яса та риби об'єм зменшується через денатурацію білків.

Надлишковий тиск усередині банки переважно обумовлений наявністю повітря, що залишилося в ній. Щоб зменшити тиск у банці під час стерилізації, необхідно максимально вилучити з неї повітря.

Стерилізація

Теплову стерилізацію консервів проводять шляхом їх нагрівання у звичайних ваннах при атмосферному тиску, коли температура стерилізації не перевищує 100°C, а також в автоклавах, коли температура стерилізації перевищує 100°C.

Автоклави для стерилізації консервів бувають періодичної та безперервної дії, а також горизонтальними і вертикальними за розташуванням. Вони представляють собою одностінні казани з опуклим днищем та відкидною опуклою кришкою.

У горизонтальних автоклавах періодичної дії консерви завантажують у корзини за допомогою вагонеток, що рухаються по рейках. Такі автоклави зазвичай встановлюють для організації прямолінійного потоку вагонеток через проліт, де завантаження відбувається з одного боку, а вивантаження — з протилежного. Проте горизонтальні автоклави потребують значних трудових витрат на завантаження та вивантаження вагонеток, а також великої площі для їх розміщення та обслуговування.

Вертикальні автоклави періодичної дії зручніші в обслуговуванні та дозволяють механізувати завантаження й вивантаження консервів. Банки розміщують у корзинах, які опускаються в автоклав і виймаються з нього за допомогою підйомного крана. При встановленні батареї вертикальних автоклавів над ними встановлюють тельфер для полегшення процесу.

Автоклави повинні бути оснащені автоматичними пристроями для контролю та регулювання, такими як термографи та терморегулятори, які

автоматично записують температуру на графіку та регулюють подачу пари в автоклав.

Стерилізація в автоклавах здійснюється за допомогою пару або води. Для консервування в скляних банках зазвичай використовують воду, оскільки нагрівання водою потребує менших температурних коливань. Для того щоб компенсувати тиск, що утворюється всередині банки, і запобігти деформації кришок, стерилізація консервів в скляній тарі проводиться під протитиском, що досягається введенням стисненого повітря або гідравлічним протитиском.

Безперервнодіючі автоклави бувають горизонтальними та вертикальними.

Горизонтальний автоклав такого типу складається з нерухомого горизонтального циліндра, на внутрішній поверхні якого закріплена напрямна спіраль. Усередині цього циліндра встановлений обертовий барабан, оснащений ребрами з кутового заліза, між якими розміщуються банки певного діаметра. Під час обертання барабана банки отримують як обертальний, так і поступальний рух уздовж спіралі.

Вертикальні безперервнодіючі автоклави є аналогічними горизонтальним, але встановлені в вертикальному положенні.

Безперервнодіючі автоклави з'єднуються з безперервнодіючими охолоджувачами для консервування.

Час стерилізації можна контролювати, змінюючи швидкість обертання внутрішнього барабана, а також шляхом завантаження банок в автоклав при постійній кількості обертів барабана через люки, розташовані на визначеній відстані один від одного. Пара надходить в безперервнодіючі автоклави через барботер.

Безперервнодіючі автоклави, окрім механізації та автоматизації процесу стерилізації, мають ще одну перевагу: завдяки обертанню банок виключається ризик перегріву або недогріву, оскільки всі банки перебувають у рівних умовах стерилізації протягом усього процесу.

Окрім стерилізації консервів паром та водою, застосовують також стерилізацію гарячим повітрям, яке для покращення теплопередачі пропускають через апарат зі швидкістю 8-10 м/с.

У таких автоклавах бляшані банки переміщуються за допомогою ланцюгового конвеєра. Час стерилізації значно зменшується порівняно з стерилізацією паром.

Процес стерилізації зазвичай складається з чотирьох фаз: підвищення температури автоклава до необхідного рівня — попередній прогрів — А; додатковий прогрів до досягнення температури стерилізації всередині банки — В; безпосередньо стерилізація консервів при заданій температурі — С; спуск пари — D.

Режим стерилізації визначається умовною формулою стерилізації у вигляді наступного виразу:

$$\frac{A + B + C + D}{T}, \quad (1.11)$$

де А, В, С і D вимірюються в хвилинах; Т — вказує температуру, при якій підтримується цей режим.

Якщо охолодження банок здійснюється безпосередньо в автоклаві, то в чисельнику додається ще час охолодження — E.

Хоча час стерилізації можна визначити математично, спираючись на дані смертельного часу мікроорганізмів, цей метод застосовується лише за умови попереднього визначення видів мікроорганізмів у стерилізованому продукті. На практиці для консервів певної рецептури та розмірів час стерилізації встановлюється емпірично, оскільки навіть при математичному підході він перевіряється експериментально.

Тривалість стерилізації складається з часу, потрібного для прогріву продукту до температури стерилізації, та часу, необхідного для знищення або інактивації мікроорганізмів.

Час, необхідний для знищення мікроорганізмів, залежить від кількості та виду мікрофлори в продуктах, їх хімічного складу та рН консервів.

З огляду на це, надзвичайно складно визначити як загальну формулу стерилізації, так і її окремі складові, зокрема тривалість додаткового прогріву та власне стерилізації консервів, оскільки харчові та м'ясні продукти, що підлягають стерилізації, не мають стандартного хімічного складу (навіть при однорідності за органолептичними ознаками). Крім того, додатковий прогрів і власне стерилізація є взаємопов'язаними процесами і не можуть бути чітко розділені. Тому доцільно в формулі стерилізації використовувати єдиний час стерилізації без розподілу на додатковий прогрів і власне стерилізацію.

Дослідження показали, що для м'ясних консервів підвищення температури (до певного рівня) з відповідним скороченням тривалості стерилізації завдає меншої шкоди якості продукту, ніж збільшення часу стерилізації при більш низькій температурі.

При наближених розрахунках dV_t можна не враховувати через його незначну величину для матеріалу банки (жерсті).

Критичний перепад тисків, при якому виникають деформації бляшаних банок, може бути визначений з достатньою точністю для практичних потреб за допомогою емпіричної формули

$$\Delta P_{кр} = \frac{600(\delta + 0,05)}{d(d - 5) + 41}, \quad (1.13)$$

де $\Delta P_{кр}$ — критичний перепад тиску в кг/см²; δ — мінімальна товщина кінців у мм; d — внутрішній діаметр банки в см.

2 Розробка схеми структури системи автоматичного регулювання

Для розробки схеми структури системи автоматичного керування автоклавом потрібно провести аналіз об'єкта керування, вибрати необхідні компоненти для системи, зокрема датчик і виконавчий механізм. Для проектування системи автоматичного регулювання (САР) важливо врахувати динамічні характеристики всіх елементів системи. Зазвичай найскладнішим і основним елементом є об'єкт керування. Аналіз технології виготовлення консервованих м'ясопродуктів, виконаний в попередньому розділі, показав складність та варіативність процесів, що відбуваються під час стерилізації. Тепер здійснимо аналіз об'єкта керування на прикладі автоклава ПКС-128.

2.1 Дослідження об'єкта керування

Автоклав ПКС-128 використовується для теплової стерилізації харчових продуктів, упакованих у скляну або бляшану тару. Він розроблений для застосування на підприємствах харчової промисловості та може працювати як з електричним, так і з паровим нагрівом.

Автоклав ПКС-128-500 (рис. 2.1) включає в себе корпус 1, фланець-кришку 2, кошики 3, блок керування 4 та змієвик 5.

Корпус 1 представляє собою термоізолюваний резервуар, який закріплений на чотирьох опорах 16, що мають отвори для анкерного кріплення корпусу до підлоги під час монтажу.

Зверху корпус закривається фланець-кришкою 2. Підйом і відведення фланець-кришки вбік здійснюється за допомогою механізму підйому фланець-кришки 7. Для забезпечення герметичності на з'єднанні фланець-кришки та фланця корпусу встановлений ущільнювальний шнур 23.

Нагрівання води в об'ємі корпусу здійснюється за допомогою ТЕНів 6, розташованих на дні, або паром, що проходить через змієвик 5. Контроль

температури води здійснюється за допомогою датчика температури 11, а моніторинг внутрішнього тиску проводиться за допомогою електроконтактного манометра 22.

Всередині корпусу, концентрично йому, розташований змійовик 5, який призначений для нагрівання води паром під час процесу нагріву. Під час охолодження автоклава через змійовик 5 подається вода для охолодження.

Кошики 3 (рис. 2.2) призначені для розміщення банок з продуктом. Банки встановлюються всередині кошиків у шаховому порядку та кількома ярусами (кількість ярусів залежить від висоти банок), при цьому між ярусами розміщуються прокладки 3. Кошики оснащені поворотними петлями 2, через які здійснюється підйом і опускання кошиків всередину корпусу за допомогою піднімального пристрою. Споживач може використовувати піднімальний пристрій будь-якої моделі, що підходить для механізації процесу підйому та опускання кошиків.

Простір між стінкою корпусу 1 та обшивкою 26 заповнений термоізоляційним матеріалом 18 для запобігання нагріванню зовнішніх поверхонь до небезпечної температури та зниження тепловтрат.

Для заповнення внутрішнього об'єму корпусу водою використовується кран наповнення 17, а для зливу — кран зливальний 28. Про достатній рівень води в автоклаві свідчить поява води з крана переливу 14.

Керування роботою автоклава здійснюється за допомогою блоку керування 4, який встановлений на поворотному кронштейні 15. Кронштейн може бути повернутий у зручне для роботи положення.

Вимірювання температури води в автоклаві здійснюється за допомогою датчика температури 11. Нагрівання води в автоклаві відбувається за допомогою ТЕНів 6 або паром, що подається від парогенератора через електромагнітний клапан 12 у змійовик 5.

1. Корпус
2. Фланець-кришка
3. Кошки
4. Блок керування
5. Змійовик
6. ТЕН
7. Механізм підйому фланець-кришки
8. Петля строповочна
9. Клапан аварійного скидання тиску
10. Датчик рівня
11. Датчик температури
12. Клапан електромагнітний
13. Насос циркуляційний
14. Кран переливу
15. Кронштейн
16. Опора
17. Кран наповнення
18. Теплоізоляційний матеріал
19. Кран для виходу пари
20. Кран для подачі охолоджуючої рідини
21. Кран для виходу охолоджуючої рідини
22. Манометр електроконтактний
23. Шнур ущільнювальний
24. Гайка
25. Болт
26. Обшивка
27. Болт заземлення
28. Кран зливальний
29. Кронштейн поворотний

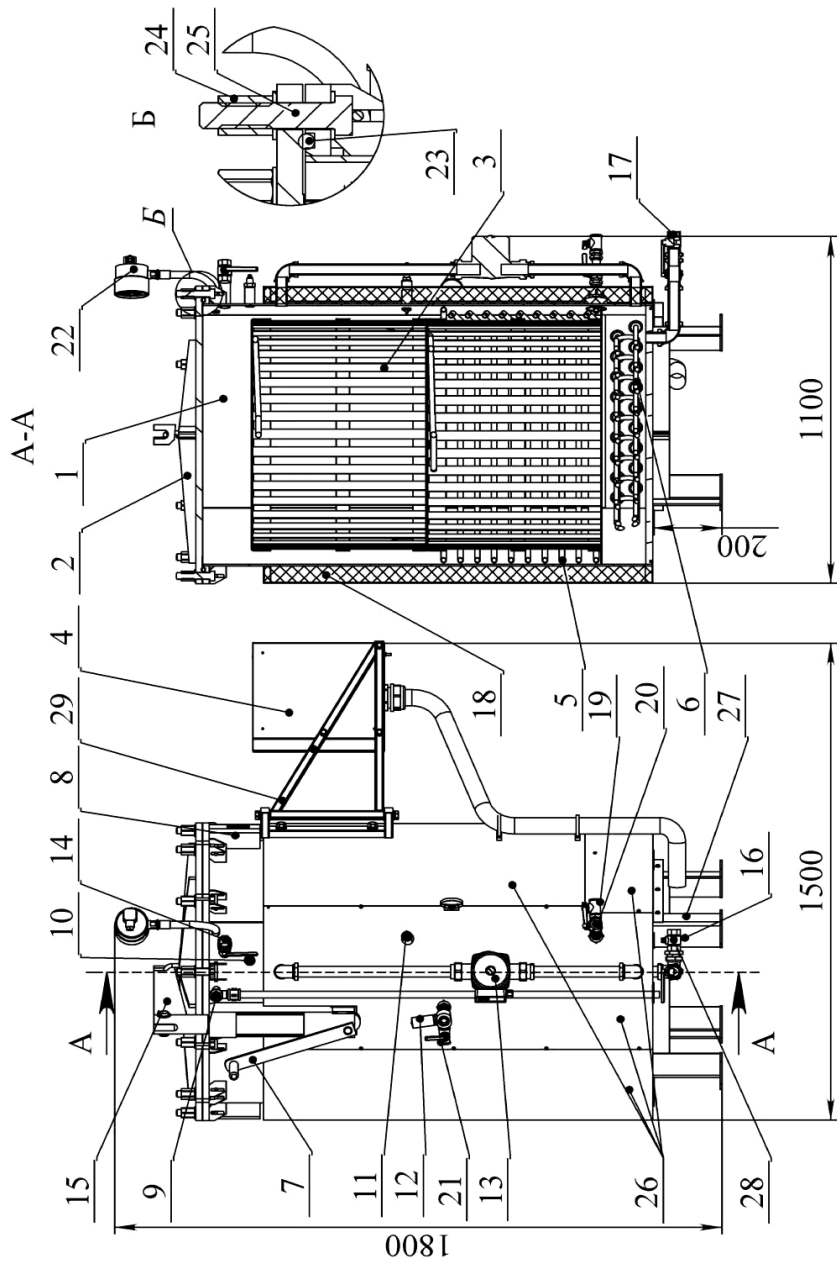
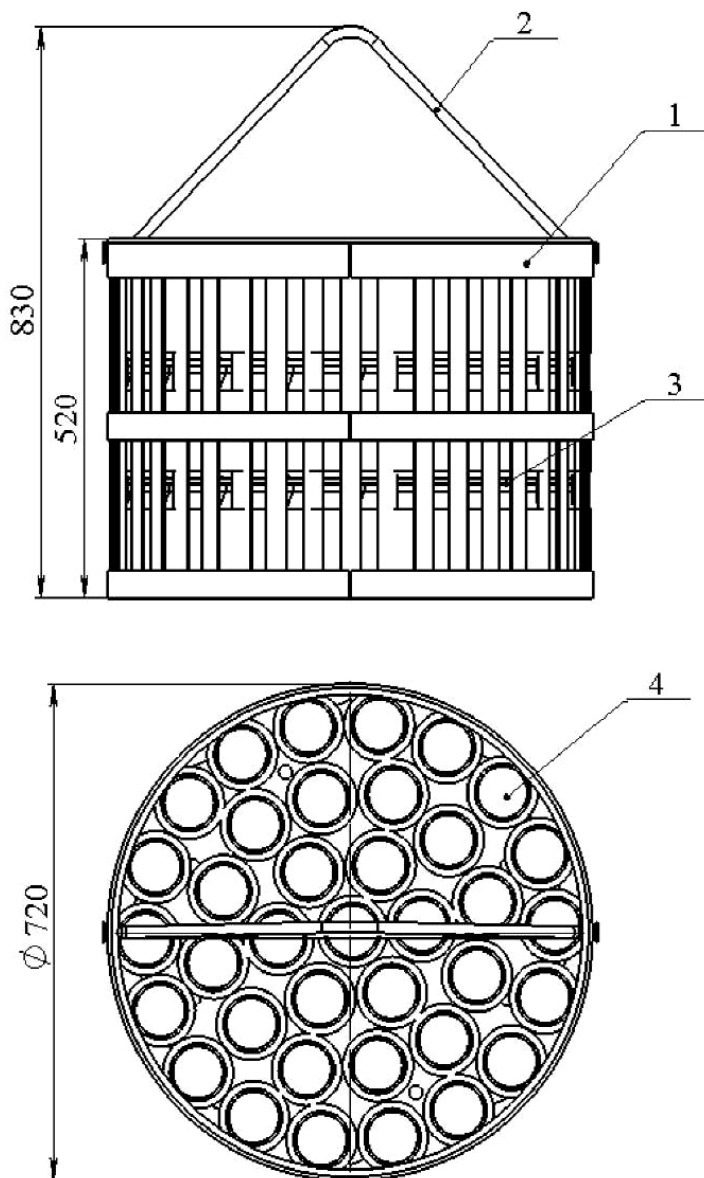


Рисунок 2.1 – Автоклав ШКС-128-500



1. Фланець
2. Петля
3. Прокладка
4. Банка продуктом

Рисунок 2.2 – Корзина

Рівень води в автоклаві вимірюється за допомогою датчика рівня 10.

Циркуляційний насос 13 забезпечує рух рідини в корпусі, що сприяє збільшенню швидкості теплопередачі та рівномірності процесів нагрівання і охолодження води в повному об'ємі корпусу. Насос працює безперервно на всіх режимах.

Кошики, наповнені банками з продуктом, розміщуються всередині корпусу автоклава. Потім корпус закривається фланець-кришкою. Фланець-кришка фіксується за допомогою болтів 25 і гайок 24, що забезпечує її щільне прилягання до фланця корпусу.

Робочий об'єм корпусу заповнюється водою до моменту появи води в крані переливу 14. Після цього на блоці керування встановлюється необхідний температурний режим, і включаються ТЕНи (в паровому варіанті відкривається електромагнітний клапан). Час витримки банок з продуктом при заданій температурі визначається відповідно до технології та встановлюється оператором.

Після завершення технологічного процесу стерилізації ТЕНи (в паровому варіанті — електромагнітний клапан) вимикаються, а індикатори «НАГРІВАННЯ 2» та «СТЕРИЛІЗАЦІЯ» на блоці керування гаснуть.

Охолодження води в автоклаві відбувається шляхом подачі води в змійовик 5 для охолодження через кран 20.

2.2 Дослідження технологічного процесу стерилізації та визначення завдань для автоматизації

У процесі стерилізації можна виділити шість основних етапів (рис. 2.3):

- 1) Початковий стан;
- 2) Першочерговий підігрів;
- 3) Завантаження автоклава;
- 4) Процес нагрівання:
 - 4.1) Початковий етап нагрівання;
 - 4.2) Основний етап нагрівання;
 - 4.3) Завершальний етап нагрівання;
- 5) Стерилізація:
 - 5.1) Початковий етап стерилізації;
 - 5.2) Основний етап стерилізації;
- 6) Охолодження:
 - 6.1) Початковий етап охолодження;
 - 6.2) Основний етап охолодження.

На етапах 4, 5 і 6 додатково виділяються кілька фаз, що зумовлені важливими особливостями алгоритму управління процесом.

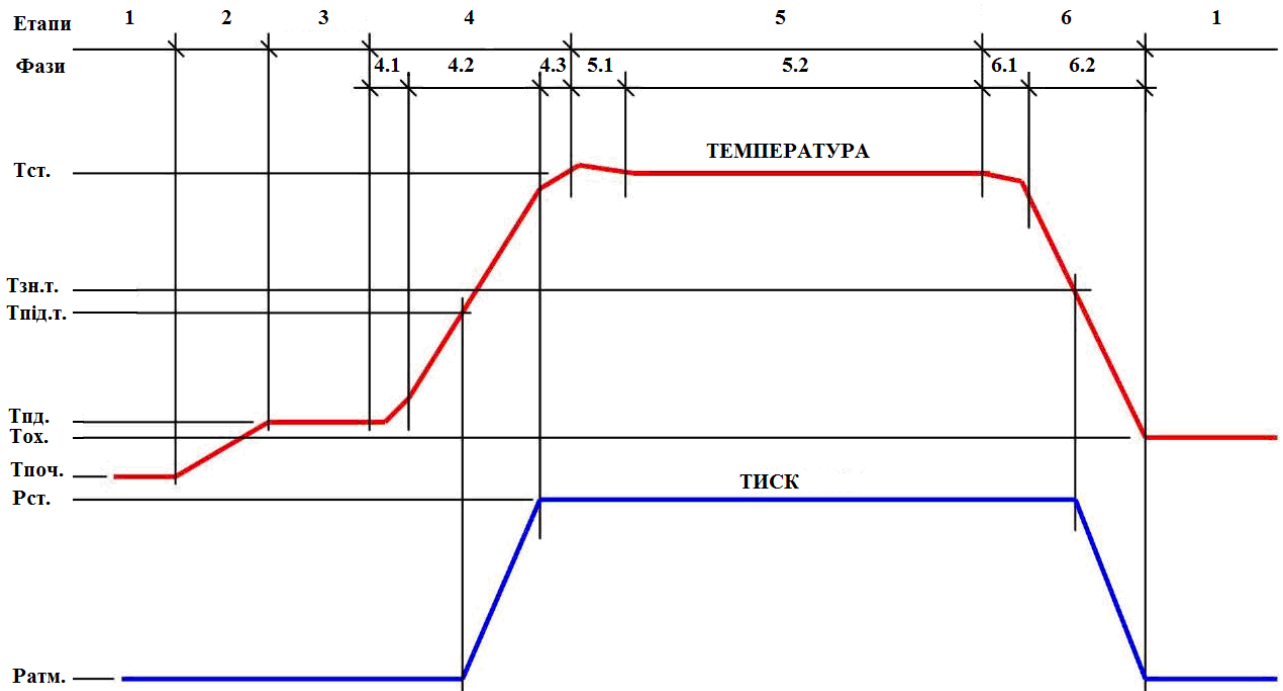


Рисунок 2.3 – Типові графіки температури та тиску для процесу стерилізації: Тпоч. – початкова температура; Тпд. – температура на етапі початкового підігріву; Тпд. – температура на момент початку підйому тиску; Тст. – температура стерилізації; Тзн.т. – температура на етапі зниження тиску; Тох. – температура охолодження; Ратм. – атмосферний тиск; Рст. – тиск на етапі стерилізації.

Основні параметри технологічного процесу визначаються за допомогою формули для стерилізації:

$$\frac{t_{nd} + t_{нагр} + t_{ст} + t_{ох}}{T_{ст}}, \quad (2.1)$$

де: $t_{пд}$ — тривалість етапу початкового підігріву;

$t_{нагр}$ — тривалість етапу нагрівання;

$t_{ст}$ — тривалість етапу стерилізації;

$t_{ох}$ — тривалість етапу охолодження;

$T_{ст}$ — температура стерилізації.

Початковий стан (перший етап) формально не є частиною процесу стерилізації. На цьому етапі система автоматичного регулювання (САР) знаходиться між циклами стерилізації. Час перебування на цьому етапі не має конкретного обмеження.

Задача регулювання не встановлюється, оскільки задані температура $T_z = T_{пч}$. навколишнього середовища та тиск $P_z = P_{атм}$. Заповнення автоклава водою на цьому етапі не є обов'язковим.

Перед початком процесу стерилізації потрібно заповнити автоклав водою.

На етапі 2 здійснюється підігрів води в автоклаві до встановленої температури. Метою цього етапу є досягнення температури $T_z = T_{пд}$ при тиску $P_z = P_{атм}$.

На етапі 3 здійснюється завантаження продуктів для стерилізації в автоклав. Тривалість цього етапу не має обмежень.

Завдання регулювання не визначається, температура T_z наближається до $T_{пд}$, а тиск P_z дорівнює атмосферному тиску $P_{атм}$.

На етапі 4 (нагрівання) встановлюється завдання регулювання температури: T_z лінійно зростає від $T_{пд}$. до $T_{ст}$. за час, визначений параметром $t_{нагр}$. Завдання по тиску: коли температура нижче заданої $T_{пд}$.т., тиск P_z дорівнює атмосферному $P_{атм}$., а при більш високій температурі тиск P_z поступово збільшується від $P_{атм}$. до $P_{ст}$. (P_z змінюється лінійно залежно від поточної температури).

На цьому етапі система автоматичного регулювання має підтримувати температуру згідно з заданою програмою, забезпечуючи її лінійне підвищення.

Етап 5 (стерилізація) є ключовим етапом технологічного процесу. На цьому етапі система повинна підтримувати задані значення температури $T_z = T_{ст}$. та тиску $P_z = P_{ст}$. Протягом часу $t_{ст}$ система автоматичного регулювання повинна виконувати функцію стабілізації, підтримуючи ці параметри на заданому рівні.

На етапі 6 (охолодження) здійснюється зниження температури та тиску до початкових значень. Завдання для температури: лінійне зменшення T_z від $T_{ст}$. до $T_{ох}$. протягом часу, визначеного параметром $t_{ох}$. Завдання для тиску: при температурі вище значення $T_{зн}$.т. тиск P_z підтримується на рівні $P_{ст}$., а

при зниженні температури P_z поступово зменшується від $P_{ст.}$ до $P_{атм.}$, де P_z є лінійною функцією поточної температури.

Охолодження здійснюється через подачу холодної води в змійовик. Система автоматичного регулювання повинна забезпечити програмно задане лінійне зниження температури, контролюючи роботу вентиля подачі холодної води.

Після завершення етапу охолодження здійснюється розвантаження автоклава, і система повертається до початкового стану.

Розглянутий технологічний режим стерилізації є константним. Однак останнім часом в технології стерилізації все частіше застосовуються варіативні режими. У таких випадках температура на п'ятому етапі стерилізації визначається не як постійна величина, як у класичному процесі, а змінюється відповідно до спеціально розрахованої програми. Використання варіативних режимів дозволяє в деяких випадках значно підвищити економічну ефективність стерилізації, при цьому зберігаючи необхідний рівень летальності у вихідному продукті без зниження його харчової цінності. Підвищення економічної ефективності досягається переважно за рахунок скорочення часу роботи стерилізаційної установки.

Отже, з усього вищесказаного можна зробити висновок, що для автоматизації процесу стерилізації, незалежно від того, чи використовується константний, чи варіативний режим, необхідно розробити систему автоматичного регулювання температурного режиму автоклава, здатну підтримувати задану програмою температуру.

2.3 Вибір датчиків та виконавчих механізмів для системи автоматичного регулювання (САР)

Для системи автоматичного регулювання температурного режиму стерилізації будуть використані пристрої, вже встановлені на автоклаві. Автоклав ПКС-128 оснащений такими компонентами: датчиком

температури ТС 1288/2-Pt100-80-(-50°C...+350°C), трубчастими електронагрівачами ТЕН 140/5,0 J220-12-01, а також електромагнітним клапаном бронзовим 15-Б-859-П для керування подачею холодної води на етапі охолодження. Ці пристрої повністю відповідають вимогам до САР, тому немає необхідності додавати нові елементи. Тепер розглянемо їх характеристики більш детально.

Принцип роботи термометрів опору базується на здатності провідників та напівпровідників змінювати свій електричний опір в залежності від температури. Залежність опору від температури провідника можна виразити за допомогою формули

$$R = Ae^{\alpha T}, \quad (2.2)$$

де A – константа; α – температурний коефіцієнт опору (ТКО); T – температура.

Якщо для початкової температури $T_0, ^\circ\text{C}$, опір провідника дорівнює R_0 , то опір R_t цього провідника при температурі $T, ^\circ\text{C}$, можна визначити за формулою

$$R_t = R_0 e^{\alpha(T-T_0)} \quad (2.3)$$

Або, застосувавши розкладання в степеневий ряд і врахувавши тільки перші два члени, отримаємо

$$R_t = R_0 [1 + \alpha(T - T_0)]. \quad (2.4)$$

Матеріали, які застосовуються для виготовлення термометрів опору, повинні мати високий і стабільний температурний коефіцієнт опору (ТКО), лінійну залежність опору від температури, а також бути інертними до впливу навколишнього середовища.

Для виготовлення провідникових термометрів опору використовують такі матеріали, як мідь, нікель, платину та вольфрам, які мають додатний температурний коефіцієнт опору (ТКО) з незначними змінами в діапазоні температур 0–150 °C для міді та нікелю і 0–600 °C для платини. За вищих температур ці матеріали схильні до інтенсивного окислення.

Для виготовлення платинових термометрів опору використовують платинову спіраль, яка поміщається в капілярну керамічну трубку, заповнену керамічним порошком, і розміщується в захисній арматурі.

Термометри опору є одними з найточніших пристроїв для вимірювання температури, з погрішністю вимірювання, яка може становити до $0,001\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Термометр опору ТС 1288/2-Pt100 має діапазон вимірювання температури від -50°C до $+350^{\circ}\text{C}$, час теплової інерції становить 15 секунд, ступінь захисту від пилу та вологи — IP54, а середній ресурс до відмови складає 15 000 годин.

Для підключення термометра опору можуть використовуватися двопровідна, трьохпровідна або чотирьохпровідна схеми. Тип підключення безпосередньо впливає на точність вимірювання температури. Найбільш часто застосовують трьохпровідну схему.

Трубчаті електронагрівачі (ТЕН) застосовуються для перетворення електричної енергії в теплову і використовуються як складові частини в промислових установках та побутових нагрівальних пристроях (рис. 2.4).

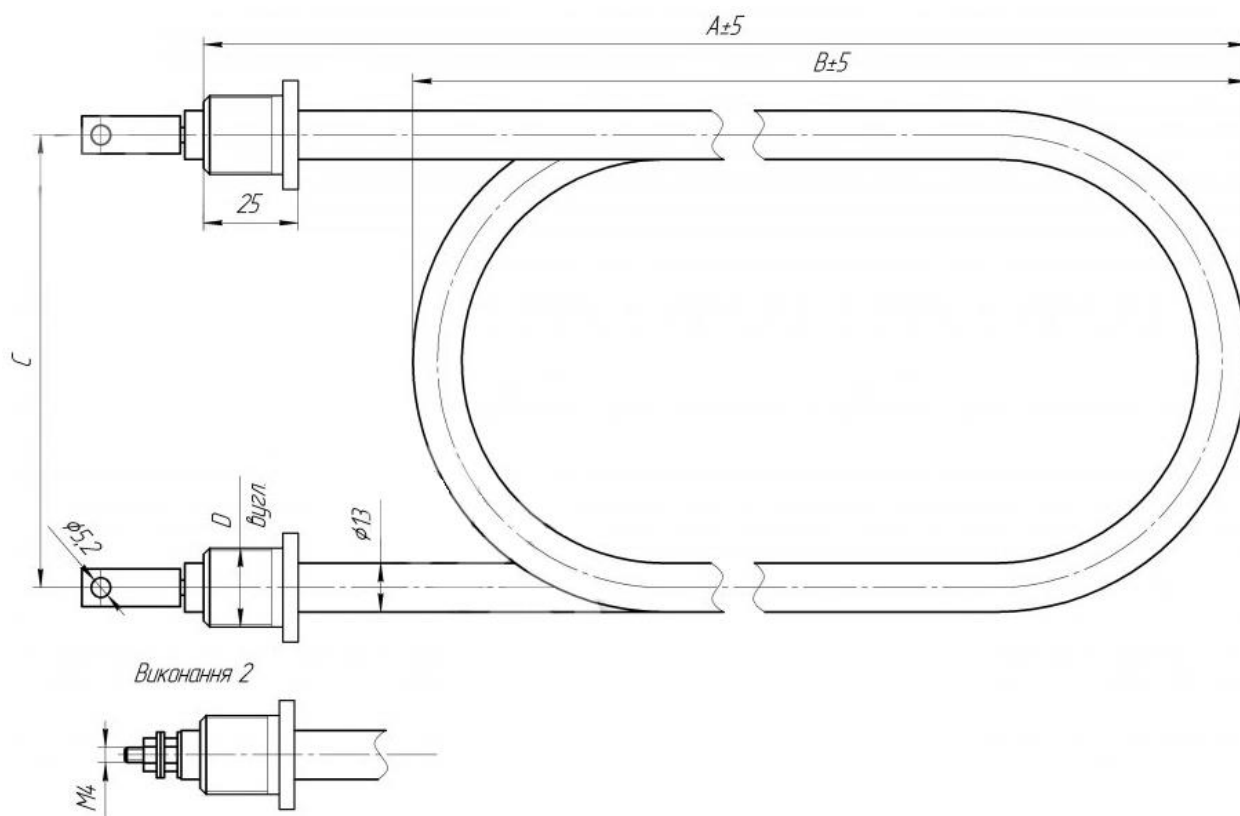


Рисунок 2.4 – Габаритні розміри трубчастого електронагрівача.

Переваги трубчастих електронагрівачів у порівнянні з іншими типами нагрівачів включають можливість їх експлуатації в безпосередньому контакті з різними середовищами (газами, рідинами, а також твердими речовинами) при тиску до 4,5 атм. Вони також відзначаються високою надійністю при вібраціях та значних ударних навантаженнях, можуть мати різноманітні конструктивні форми та забезпечують відсутність напруги на зовнішній оболонці.

Конструкція двохкінцевого трубчатого електронагрівача круглої форми передбачає розміщення всередині металевої оболонки нагрівального елемента (спіралі або кількох спіралей зі сплаву з високим опором), який з'єднаний з контактними стержнями. Нагрівальний елемент ізолюваний від оболонки за допомогою запресованого електроізоляційного матеріалу. Для запобігання проникненню вологи з навколишнього середовища, торці ТЕНа герметизуються. Контактні стержні від оболонки ізолювані діелектричним матеріалом.

ТЕН 140/5,0 J220, який встановлений в автоклаві ШКС-128, має такі характеристики: потужність – 5 кВт, напруга живлення – 220 В, матеріал трубки – нержавіюча сталь, загальна довжина трубки – 140 см,

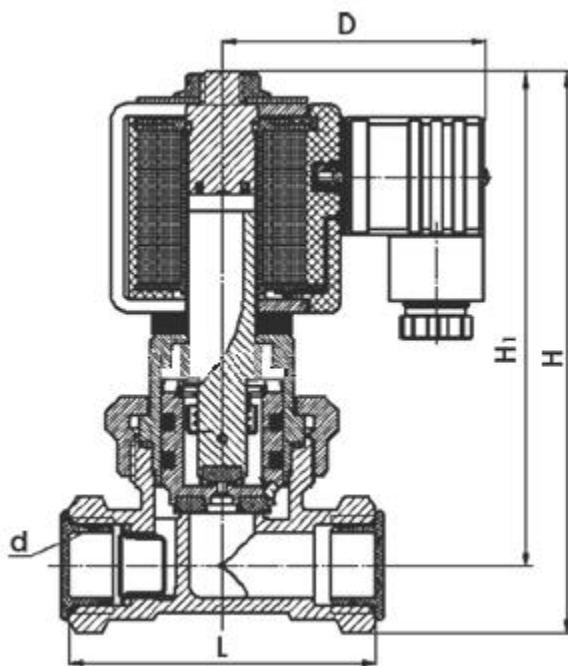


Рисунок 2.5 – Електромагнітний клапан 15-Б-859-П

Електромагнітний бронзовий клапан 15-Б-859-П (рис. 2.5) використовується як запірний механізм з дистанційним керуванням для трубопроводів у різних системах.

У системі автоматичного регулювання температури автоклава трубчаті електронагрівачі та електромагнітний клапан можуть працювати в імпульсному режимі. Для цього регулятор має генерувати керуючі сигнали у вигляді широтно-імпульсно модульованих (ШІМ) сигналів. Відсоток заповнення імпульсом інтервалу передачі сигналу визначатиме необхідну температуру для ТЕНів на етапах нагрівання і стерилізації, а також обсяг подачі холодної води через електромагнітний клапан на етапі охолодження.

2.4 Схема структури системи автоматичного регулювання температурного режиму автоклава

Як було зазначено раніше, система автоматичного регулювання температурного режиму автоклава повинна виконувати функції слідкуючої системи. Це означає, що температурний режим роботи автоклава має бути програмно заданим відповідно до формули стерилізації. САР повинна забезпечити максимально точне досягнення заданого значення температури, тобто мінімізувати похибку Δt .

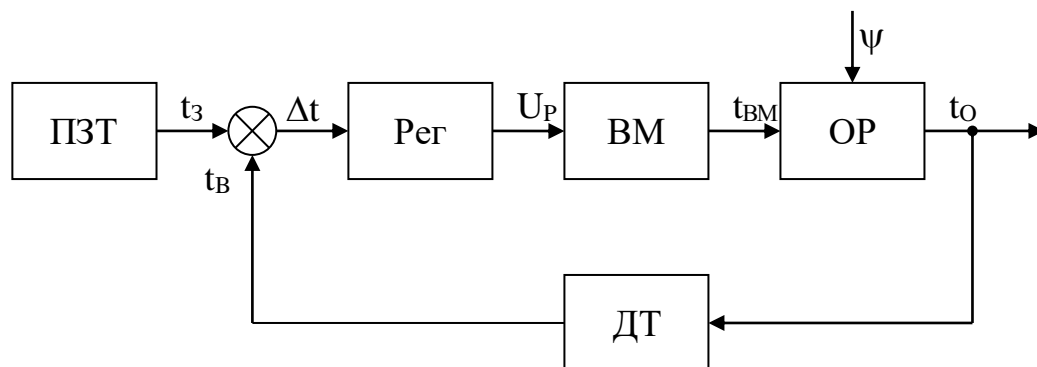


Рисунок 2.6 – Структурна діаграма системи автоматичного регулювання температурного режиму автоклава

На структурній схемі (рис. 2.6) показано, як працює система автоматичного регулювання. Об'єктом регулювання (ОР) є внутрішній простір автоклава, де розміщені продукти стерилізації та вода, що заповнює цей простір. Температура об'єкта регулювання, позначена як t_o , вимірюється за допомогою датчика (ДТ). Сигнал з датчика перетворюється на цифровий формат t_B і порівнюється з програмно заданою температурою t_3 , яку встановлює програмний задавач температури (ПЗТ). Відхилення температури Δt від заданого значення передається на регулятор (Рег), який на основі розрахунку формує керуючий сигнал U_P для виконавчого механізму (ВМ). Виконавчим механізмом є ТЕН, що нагрівається і передає тепло на об'єкт регулювання.

3 Розробка системи автоматичного регулювання температурного режиму автоклава

Аналіз компонентів системи автоматичного регулювання температурного режиму автоклава вказує на необхідність створення слідкуючої САР. Вивчення технологічного процесу стерилізації показало, що цей процес має значну тривалість, температура змінюється дуже повільно на етапах нагрівання та охолодження, а на етапі стерилізації залишається майже сталою, навіть у варіативному режимі. Це дозволяє зробити висновок, що розрахунок регулятора можна проводити за аналогією з системою стабілізації. Оскільки динаміка програмного сигналу має інфранизьку частоту, цей сигнал можна вважати сталим.

3.1 Вибір способу розробки регулятора

Основу наукового підходу до динамічного проектування складають методи синтезу оптимальних систем управління, до яких висуваються такі вимоги:

- вони повинні максимально враховувати реальні умови експлуатації та забезпечувати високу ефективність;
- бути простими і зручними для практичного застосування;
- застосовувати квадратичний критерій якості.

На сьогоднішній день існує багато підходів і методів для розробки оптимальних регуляторів. Для вибору подальшого алгоритму синтезу, який буде застосований при розробці системи, потрібно розглянути різноманітні методи синтезу та провести їх аналіз, щоб обрати найбільш підходящий для даного випадку.

Один з найпоширеніших методів синтезу — метод амплітудно-фазових характеристик у різних модифікаціях. Цей метод має значні переваги, такі як простота і наочність, але також і кілька суттєвих недоліків. Наприклад, при

виборі параметрів коректуючих контурів не враховуються енергетичні витрати на управління, що може призвести до неоправданого завищення потужності виконавчих механізмів. Крім того, метод амплітудних характеристик не дає відповіді на питання, який порядок коректуючого пристрою вибирати і яке максимальне якість перехідного процесу можна досягти в замкнутій системі "об'єкт + регулятор" з урахуванням різних обмежень (наприклад, властивості об'єкта). Тобто, метод не допомагає визначити, до яких меж можна ускладнювати проектувану систему.

Підходи, що використовують методи синтезу замкнених систем, еквівалентних розімкненим, вимагають обов'язкової стійкості як об'єкта, так і системи вимірювань. Однак ефективність практичних рішень, що базуються на цих методах, є порівняно низькою, і вони часто призводять до неоднозначностей при побудові структури оптимальної системи.

Підходи, засновані на теорії інваріантності, в основному орієнтовані на системи детермінованого управління.

Детерміноване оптимальне управління для розімкнених систем зазвичай не враховує реальні стохастичні умови практичних задач. Управлінські завдання вирішуються на обмеженому проміжку часу.

Варіаційні задачі детермінованого управління з пасивним зворотним зв'язком, включаючи багатоетапні задачі "аналітичного конструювання", застосовують такі основні методи, як динамічне програмування, принцип максимуму та інші. Ці задачі є ефективними, коли тривалість роботи системи близька до часу "пам'яті" системи.

На сьогодні досягти найвищих показників якості функціонування складного динамічного об'єкта можна переважно лише в оптимальних системах, синтезованих за технологіями, що ґрунтуються на ідеях калманівських або вінерівських методів оптимальних фільтрів.

Особливість першого підходу полягає в використанні фільтрів Калмана–Б'юсі для прямих та зворотних зв'язків систем, оцінці

стохастичного стану керованих об'єктів і застосуванні результатів цих оцінок для вибору оптимального управління замкнутими системами.

У задачах оптимального стохастичного управління ефективність результатів залежить від успішного розв'язування рівнянь Ріккати. У таких задачах стійкість системи на нескінченному інтервалі часу забезпечується при асимптотично стійкому об'єкті та спостерігачеві.

Особливістю вінеровського підходу до створення оптимальних систем за стохастичних впливів є попередній вибір оптимальних структур регуляторів та оцінка ефективності й якості розроблюваної системи, а вже після цього — її створення та доопрацювання на практиці. Такий підхід забезпечує конкурентоспроможність системи. Важливою перевагою синтезу оптимальних систем з використанням методу Вінера–Колмогорова є те, що процедура синтезу автоматично гарантує стійкість замкненої оптимальної системи. Практичні результати, отримані за допомогою зазначених алгоритмів, підтверджують їх високу ефективність при стохастичних впливах. У системах, синтезованих за цими алгоритмами, є можливість підвищити точність стабілізації на один-два порядки.

Отже, на основі проведеного аналізу технологічного процесу збору зернових як динамічної системи та враховуючи взаємозв'язки між технологічними параметрами й енергетичними витратами під час обробки, для досягнення максимальної точності стабілізації слід застосувати метод, описаний у роботі [5]. Основою цього методу є результати структурної ідентифікації моделей динаміки досліджуваного об'єкта, отримані в результаті експериментів, проведених у реальних умовах експлуатації.

Отже, завданням синтезу системи автоматичного регулювання температурного режиму автоклава є визначення структури та параметрів оптимального регулятора, здатного забезпечити підтримку температури відповідно до заданого програмного сигналу.

У термінах роботи [5] задача синтезу системи стабілізації за випадкових впливів формулюється наступним чином. Задано структурну

схему системи (рис. 3.1), на входах якої діють вектори центрованих стаціонарних випадкових процесів ψ_0 , φ_0 . Також припускаємо, що динаміка взаємозв'язку між входом і виходом об'єкта керування відома і описується системою звичайних диференціальних рівнянь

$$P_0 x_0 = M_0 u + \psi_0, \quad (3.1)$$

де x_0 – n -вимірний вектор вихідних координат об'єкта;

u – m -вимірний вектор сигналів керування;

P_0 – поліноміальна матриця розміру $n \times n$, яка залежить від оператора диференціювання s . Цей поліном має лише стійкі корені;

M_0 – поліноміальна матриця розміру $n \times m$;

ψ_0 – n -вимірний вектор стаціонарних випадкових збурень з нульовими математичними очікуваннями і дробово-раціональною матрицею спектральних щільностей $S_{\psi_0\psi_0}$. Вектор вихідних координат об'єкта вимірюється повністю за допомогою системи неідеальних датчиків, динаміка яких описується матрицею передатних функцій K_0 , а похибки вимірювання представлені вектором φ_0 стаціонарних випадкових центрованих процесів з відомою матрицею спектральних щільностей $S_{\varphi_0\varphi_0}$.

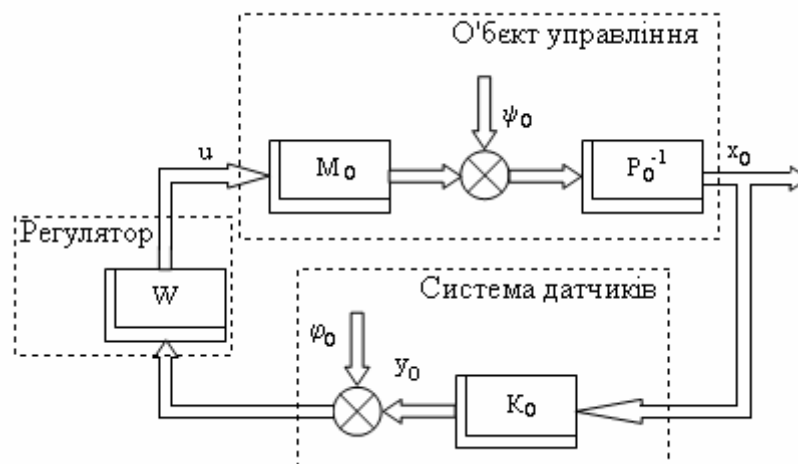


Рисунок 3.1 – Структура багатовимірної системи стабілізації.

Потрібно визначити структуру та параметри матриці передатних функцій регулятора W , щоб замкнена система "об'єкт-регулятор" була стійкою та досягала мінімуму заданого функціоналу якості.

$$e = \frac{1}{j} \int_{-j\infty}^{j\infty} \text{tr}(S'_{x0x0} R + S'_{uu} C) ds, \quad (3.2)$$

де j — комплексна одиниця,

tr — операція знаходження сліду матриці;

S_{x0x0} — матриця спектральних щільностей зміни вихідних координат системи розміру $n \times n$;

" / " — позначення транспонування матриці;

R — додатно визначена поліноміальна вагова матриця розміру $n \times n$;

S_{uu} — матриця спектральних щільностей зміни вектора сигналів керування системи розміру $m \times m$;

C — невід'ємно визначена поліноміальна вагова матриця розміру $m \times m$;

$s=j\omega$ — комплексний аргумент.

У роботі [5] доведено, що для стійкого об'єкта керування матриця передатних функцій оптимального регулятора (W) , яка задовольняє умови задачі синтезу, визначається як добуток двох матриць передатних функцій

$$W = F_u^\psi (F_x^\psi)^{-1}, \quad (3.3)$$

де

F_u^ψ — фізично реалізована матриця передатних функцій замкнутої системи «об'єкт-регулятор», яка описує перехід від вектора збурень ψ_0 до вектора сигналів керування u та мінімізує критерій якості (3.2);

F_x^ψ — матриця передатних функцій замкнутої системи «об'єкт-регулятор», яка описує перехід від вектора збурень ψ_0 до вектора вихідних координат x , отримана з рівняння зв'язку, вперше обґрунтованого у роботі [5].

$$F_x^\psi = P^{-1}(MF_u^\psi + E_n), \quad (3.4)$$

де

P — поліноміальна матриця розміру $n \times n$, що описує динаміку розширеного об'єкта керування, включаючи систему датчиків

$$P = K_{10} P_0 K_0^{-1}; \quad (3.5)$$

M — поліноміальна матриця розміру $n \times n$, що визначає чутливість розширеного об'єкта до змін сигналів керування

$$M = K_{10} M_0; \quad (3.6)$$

K_{10} — результат видалення полюсів ліворуч або розкладу ліворуч матричного добутку $P_0 K_0^{-1}$ за методом MFD.

„-1” у верхньому індексі позначає обертання (обратну) матриці.

Фізично реалізована та стійка матриця передатних функцій F_u^Ψ згідно з основним методом синтезу [5] є рівною

$$F_u^\Psi = -\Gamma^{-1} (N_0 + N_+) D^{-1}, \quad (3.7)$$

де

Γ — дробово-раціональна та стійка матриця розміру $m \times m$, отримана в результаті вінеровської факторизації праворуч від суми матриць.

$$\Gamma = \left[M_* P_*^{-1} K_{0*}^{-1} \begin{pmatrix} E_n \\ O_n \end{pmatrix} R (E_n \quad O_n) K_0^{-1} P^{-1} M + C \right]^+, \quad (3.8)$$

У цьому контексті верхній індекс „+” позначає операцію факторизації праворуч, E_n — одинична матриця розміру $n \times n$, O_n — нульова матриця розміру $n \times n$, а індекс „*” вказує на операцію ермітового спряження матриці.

D — дробово-раціональна та стійка матриця розміру $n \times n$ з оберненою матрицею, отримана в результаті вінеровської факторизації ліворуч від добутку матриць

$$D = \left[(E_n \quad P) S_{\xi\xi}^{-1} \begin{pmatrix} E_n \\ P_* \end{pmatrix} \right]^+, \quad (3.9)$$

У якій верхній індекс „+” позначає операцію факторизації ліворуч, а $S_{\xi\xi}^{\prime}$ — транспонована матриця спектральних щільностей вектора ξ , який формується з векторів ψ_0 та φ_0 (рис. 3.1).

$$\xi = [\psi_0' K_{10}' \quad \varphi_0']'; \quad (3.10)$$

N_{0+N_+} — дробово-раціональна матриця з стійкими полюсами, отримана в результаті вінеровського розщеплення (сепарації) добутку матриць.

$$N = \Gamma_*^{-1} M_* P_*^{-1} K_{0*}^{-1} \begin{pmatrix} E_n \\ O_n \end{pmatrix} R (E_n \quad O_n) K_0^{-1} [P^{-1} (E_n \quad P) - (O_n \quad E_n)] S_{\xi\xi}^{\prime} \begin{pmatrix} E_n \\ P_* \end{pmatrix} D_*^{-1}. \quad (3.11)$$

Отже, відповідно до запропонованого алгоритму (3.3)-(3.11) для визначення структури та параметрів оптимального регулятора, необхідно виконати таку послідовність кроків:

- обрати вагові коефіцієнти R і C ;
- знайти вираз для $\Gamma^* \Gamma$ та провести його факторизацію;
- обчислити вираз DD^* та здійснити його факторизацію;
- розрахувати вираз для T і провести його сепарацію;
- знайти передатну функцію F_u^{ψ} ;
- за допомогою рівняння зв'язку визначити передатну функцію F_x^{ψ} ;
- використовуючи знайдені F_u^{ψ} та F_x^{ψ} передатні функції,

обчислити передатну функцію регулятора з рівняння (3.10).

Для того щоб прийняти рішення щодо подальшого використання отриманих результатів, необхідно провести аналіз ефективності системи автоматичного регулювання температурного режиму автоклава з оптимальним регулятором.

3.2 Розробка регулятора

Відповідно до структурної схеми системи автоматичного регулювання температурного режиму автоклава (рис. 2.6), система складається з об'єкта регулювання, датчика температури, регулятора та виконавчого механізму. Провівши аналіз літератури та технічних характеристик складових елементів системи, можна визначити їх передатні функції:

$$W_{OP}(s) = \frac{k_{OP}}{T_{OP}s + 1}; \quad (3.12)$$

$$W_{DT}(s) = \frac{k_{DT}}{T_{DT}s + 1}; \quad (3.13)$$

$$W_{BM}(s) = \frac{k_{BM}}{T_{BM}s + 1}. \quad (3.14)$$

Щодо збурень, які впливають на об'єкт регулювання, можна зазначити, що їхні джерела та природа дуже різноманітні. Тому узагальнений вплив цих збурень можна описати як стаціонарний випадковий процес з нульовим математичним сподіванням і спектральною щільністю, що має характеристики обмеженого «білого» шуму:

$$S_{\psi\psi}(s) = \frac{\sigma_{\psi}^2}{\pi} \left| \frac{1}{T_{\psi}s + 1} \right|^2. \quad (3.15)$$

Щодо похибки вимірювання φ_0 , то її спектральну щільність можна також представити у вигляді «білого» шуму:

$$S_{\varphi_0\varphi_0}(s) = \frac{\sigma_{\varphi_0}^2}{\pi}. \quad (3.16)$$

Для застосування алгоритму синтезу регулятора (3.3)-(3.11) потрібно здійснити структурні перетворення системи (рис. 2.6) до форми, зображеної на рисунку 3.1. Це передбачає визначення поліномів $M_0(s)$,

$P_0(s)$ та $K_0(s)$, а також спектральної щільності $S_{\psi_0\psi_0}(s)$ для оновленої структурної схеми.

Визначимо необхідні параметри для виразів (3.12) – (3.16) та проведемо відповідні розрахунки вихідних даних, що необхідні для синтезу регулятора.

$k_{OP} = 0,2$; $T_{OP} = 600$ с; $k_{BM} = 20$ °C/В; $T_{BM} = 40$ с; $k_{TD} = 1$; $T_{TD} = 15$ с;
 $\sigma_{\psi} = 0,5$ °C; $T_{\psi} = 0.1$ с; $\sigma_{\varphi_0} = 0,5$.

$$M_0(s) = 1.667 \cdot 10^{-4} \quad (3.17)$$

$$P_0(s) = (s + 0.001667)(s + 0.025) \quad (3.18)$$

$$K_0(s) = \frac{0.06667}{(s + 0.06667)} \quad (3.19)$$

$$S_{\psi_0\psi_0}(s) = \frac{7161972.4391(s + 0.025)(s - 0.025)}{(s + 10)(s - 10)} \quad (3.20)$$

$$S_{\varphi_0\varphi_0}(s) = 0.079577 \quad (3.21)$$

Наступним кроком буде визначення поліномів $M(s)$ та $P(s)$ за допомогою виразів (3.5) та (3.6), при цьому після видалення полюсів ліворуч отримуємо значення $K_{10} = 0.0667$.

$$M(s) = 1.111 \cdot 10^{-5} \quad (3.22)$$

$$P(s) = (s + 0.001667)(s + 0.025)(s + 0.06667) \quad (3.23)$$

Для застосування алгоритму синтезу регулятора визначимо вагові коефіцієнти функціоналу якості

$$R = 1; \quad C = 1. \quad (3.24)$$

Підставивши вихідні дані з виразів (3.20), (3.21) та (3.23) у формули (3.9) та (3.10) і здійснивши факторизацію отриманого результату, вдалося визначити значення D :

$$D = \frac{0.28209(s + 11.2)(s + 0.025)(s^2 + 9.355 \cdot s + 56.47)}{(s + 10)} \quad (3.25)$$

Наступним етапом виконання алгоритму синтезу є знаходження дробово-раціональної функції Γ через факторизацію правої частини виразу (3.8).

$$\Gamma = \frac{(s + 0.02401)(s + 0.007155)}{(s + 0.001667)(s + 0.025)} \quad (3.26)$$

Підготовка дробово-раціональної матриці N для сепарації та її власне сепарація були виконані за допомогою алгоритму (3.11) з використанням даних, визначених виразами (3.19) – (3.26), що дозволило отримати наступний результат

$$N_0 + N_+ = \frac{196.8562}{(s + 0.001667)} \quad (3.27)$$

Застосування формули (3.7) до даних, визначених виразами (3.25) – (3.27), дозволило отримати варіаційну матрицю передатних функцій оптимальної системи від вектору зовнішніх збурень ψ_0 до сигналу керування u .

$$F_u^\psi = \frac{697.837(s + 10)}{(s + 0.02401)(s + 0.007155)(s + 11.2)(s^2 + 9.355s + 56.47)} \quad (3.28)$$

Отриманий результат (3.28) та вирази P і M , задані через рівняння (3.22), (3.23), дозволили визначити передатну функцію оптимальної системи стабілізації від вектора збурень ψ_0 до вектора вихідних координат x_0 , використовуючи рівняння зв'язку (3.4) у відповідній формі

$$F_x^\psi = \frac{(s + 0.02952)}{(s + 0.007155)(s + 0.02401)(s + 0.025)(s + 0.06667)} \quad (3.29)$$

Отримані вирази F_u^ψ та F_x^ψ дозволили провести розрахунок передатної функції оптимального регулятора W , яка гарантує стійкість системи та мінімізує критерій якості (3.2), відповідно до алгоритму (3.3):

$$W = \frac{697.837(s + 10)(s + 0.06667)(s + 0.025)}{(s + 0.02952)(s + 11.2)(s^2 + 9.355s + 56.47)} \quad (3.30)$$

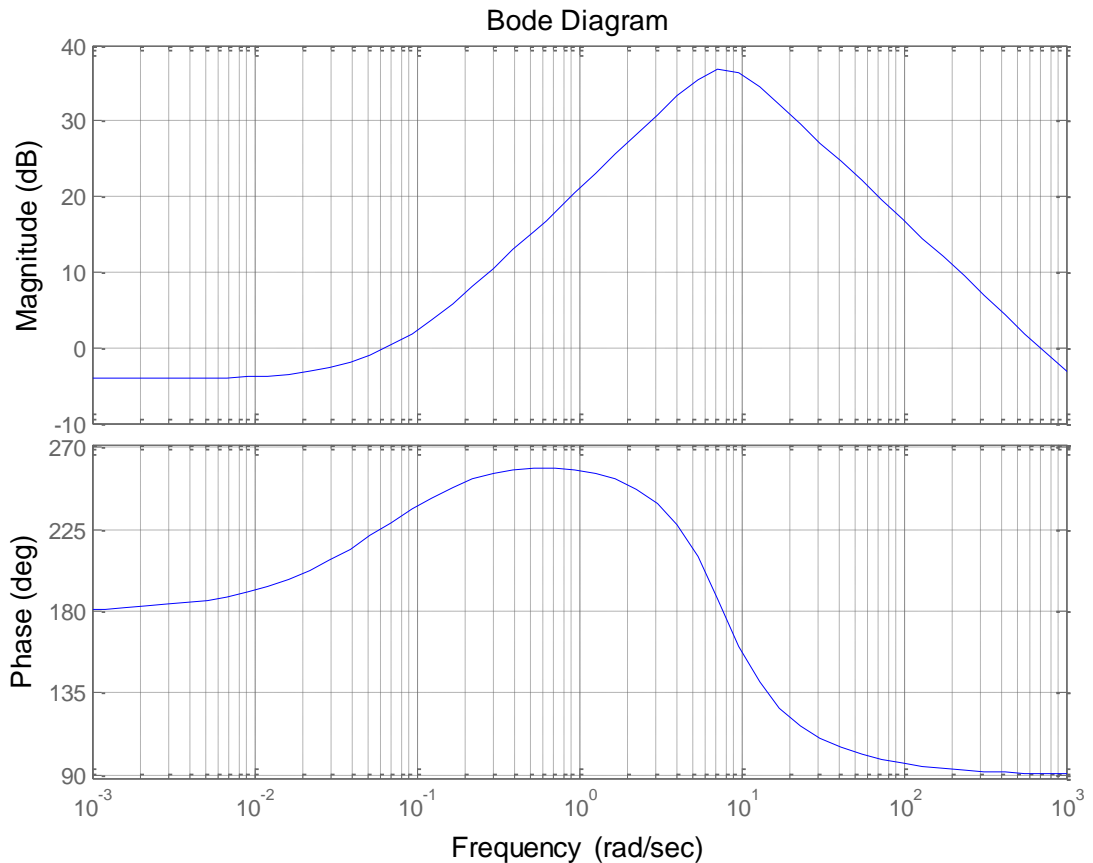


Рисунок 3.2 – Частотна характеристика оптимального регулятора

Отже, задача синтезу оптимального регулятора для системи автоматичного регулювання температурного режиму автоклава була успішно розв’язана.

3.3 Моделювання функціонування системи автоматичного регулювання температурного режиму автоклава

Для перевірки ефективності системи автоматичного регулювання температурного режиму автоклава та оцінки якості регулювання за допомогою розробленого регулятора було застосовано метод імітаційного моделювання. Модель системи була розроблена в середовищі MATLAB з використанням пакету Simulink, відповідно до структурної схеми, наведеної на рисунку 2.6.

Елементи системи автоматичного регулювання були задані за допомогою блоку «Transfer Fcn» з розділу Continuous бібліотеки Simulink. У цьому блоці передатні функції компонентів системи задаються через коефіцієнти поліномів чисельника та знаменника (рис. 3.3).

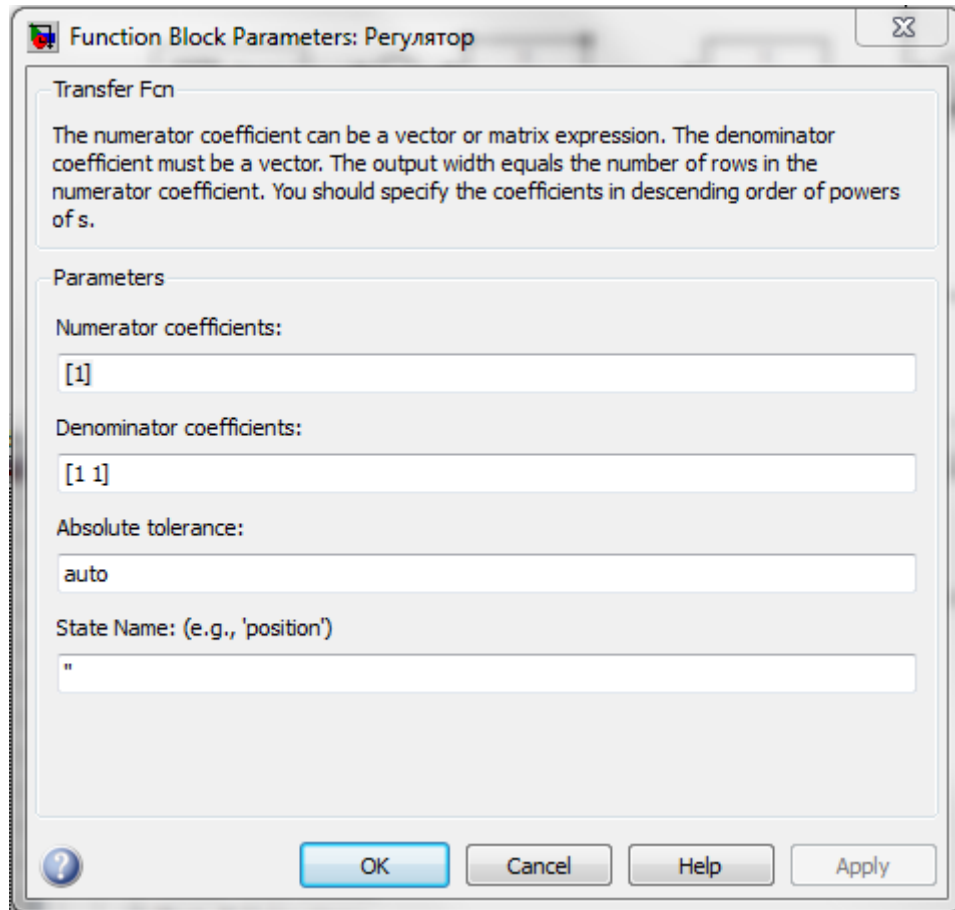


Рисунок 3.3 – Налаштування блоку «Transfer Fcn»

Таким чином, були налаштовані блоки: регулятор, виконавчий механізм, об'єкт управління та температурний датчик.

Для визначення програмного сигналу було використано блок «Signal Builder» з розділу Sources бібліотеки Simulink (рис. 3.4). У цьому блоці форма сигналу задається ламаною лінією. Параметри блоку були налаштовані таким чином: початкова температура 20 °С, час підвищення температури до температури стерилізації 2000 с, температура стерилізації 115 °С, тривалість етапу стерилізації 5000 с, тривалість етапу охолодження 3000 с, кінцева температура після охолодження 20 °С.

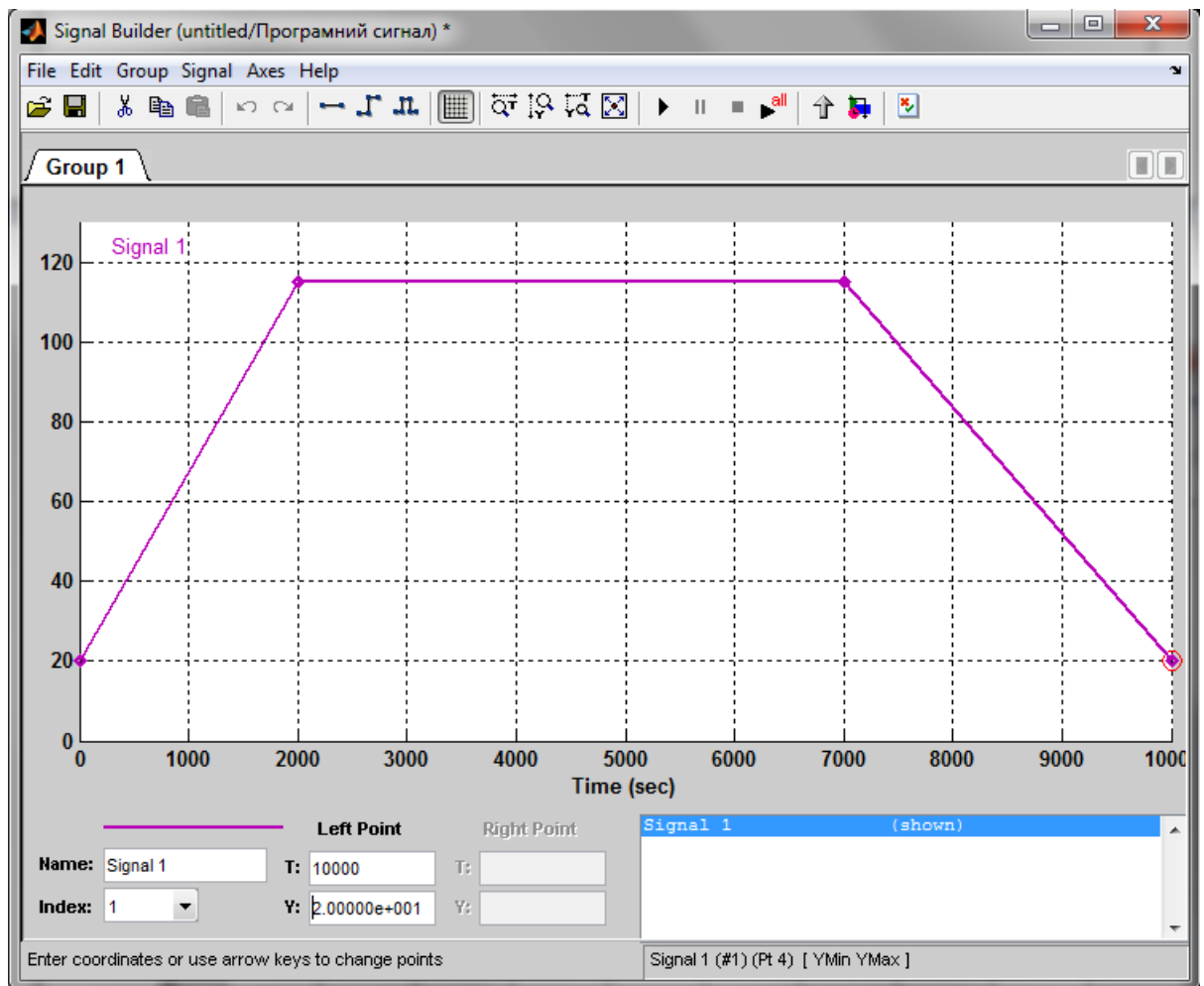


Рисунок 3.4 – Налаштування блоку «Signal Builder»

Для генерації збурюючого впливу було використано блок «Band-Limited White Noise» з розділу Sources бібліотеки Simulink (рис. 3.5). Цей блок генерує випадковий сигнал із нормальним розподілом амплітуд та рівномірною амплітудо-частотною характеристикою, що відповідає «внутрішньому шуму». У блоці налаштовуються такі параметри: Noise power — потужність збурюючого впливу в межах частотної смуги сигналу; Sample time — час між відліками сигналу шуму, тобто час дискретизації; Seed — початкове значення для генератора випадкових чисел.

Отже, цей блок генерує випадковий сигнал з нормальним розподілом, і за допомогою параметра Sample time можна встановити обмеження на смугу частот, яке враховується у виразі (3.15).

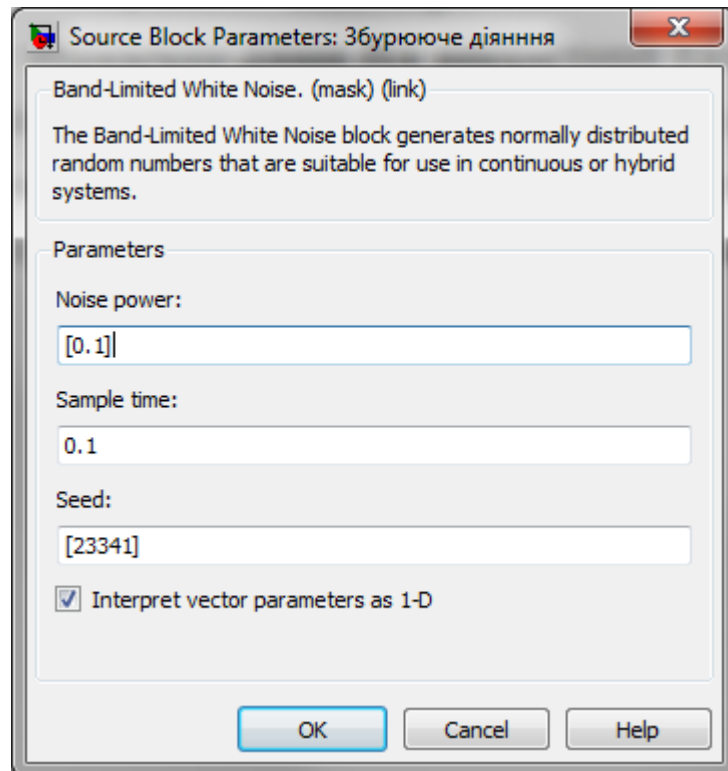


Рисунок 3.5 – Налаштування блоку «Band-Limited White Noise»

Для моніторингу поточної та заданої температури був використаний блок «Score» з розділу Sinks бібліотеки Simulink (рис. 3.6).

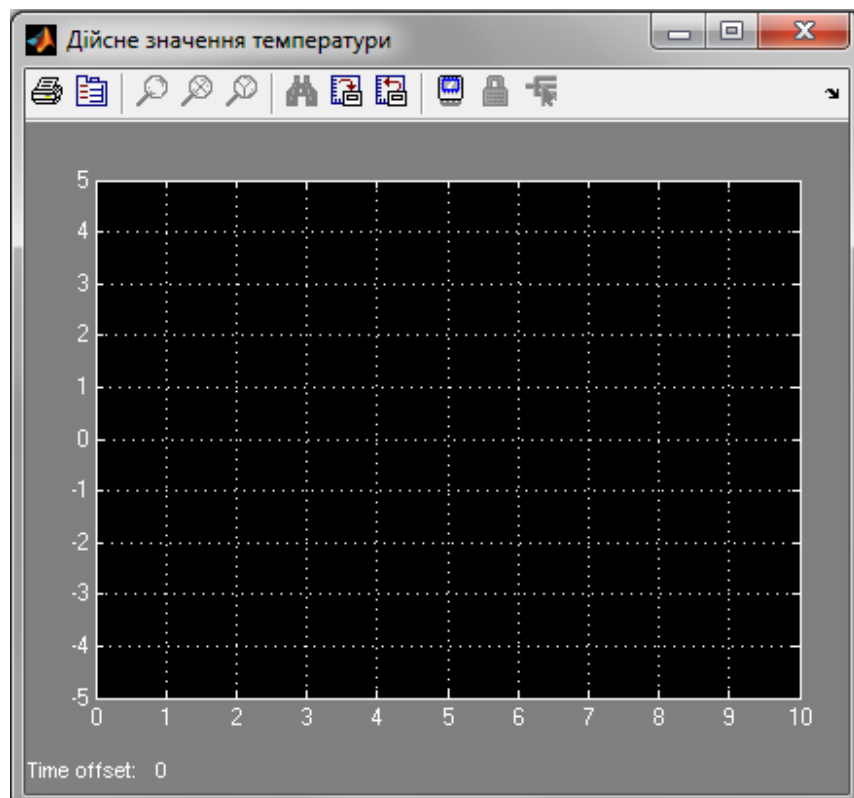


Рисунок 3.6 – Блок «Score»

В результаті розробки була створена модель системи автоматичного регулювання температурного режиму автоклава (рис. 3.7).

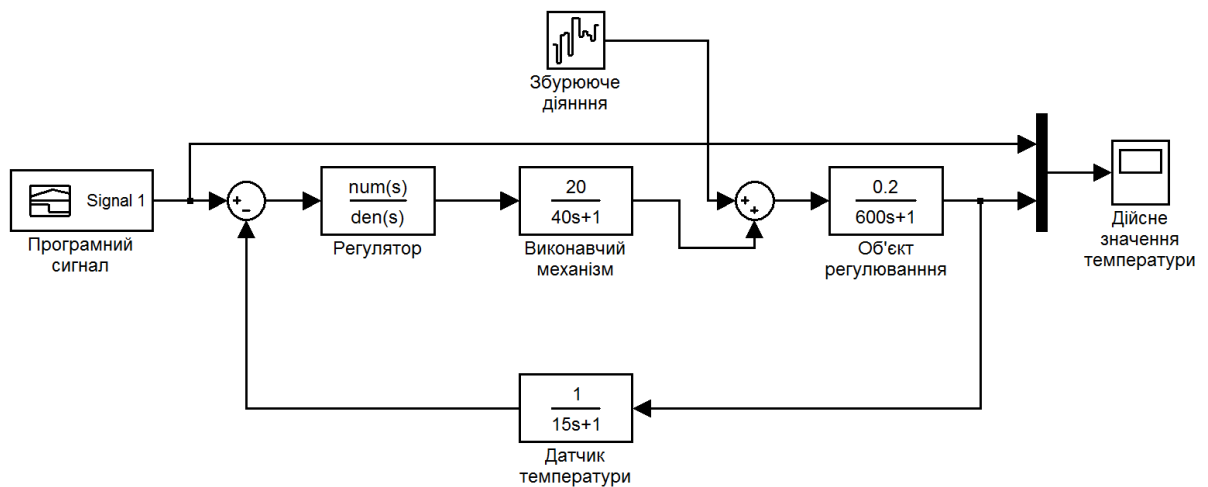


Рисунок 3.7 – Схема моделі системи автоматичного регулювання температурного режиму автоклава

Результатом комбінації програмного сигналу та збурюючого впливу є сигнал, зображений на рисунку 3.8. Як показано на графіку, збурюючий вплив створює випадковий сигнал, який коливається навколо програмного, при цьому відхилення перевищують $\pm 5^{\circ}\text{C}$.

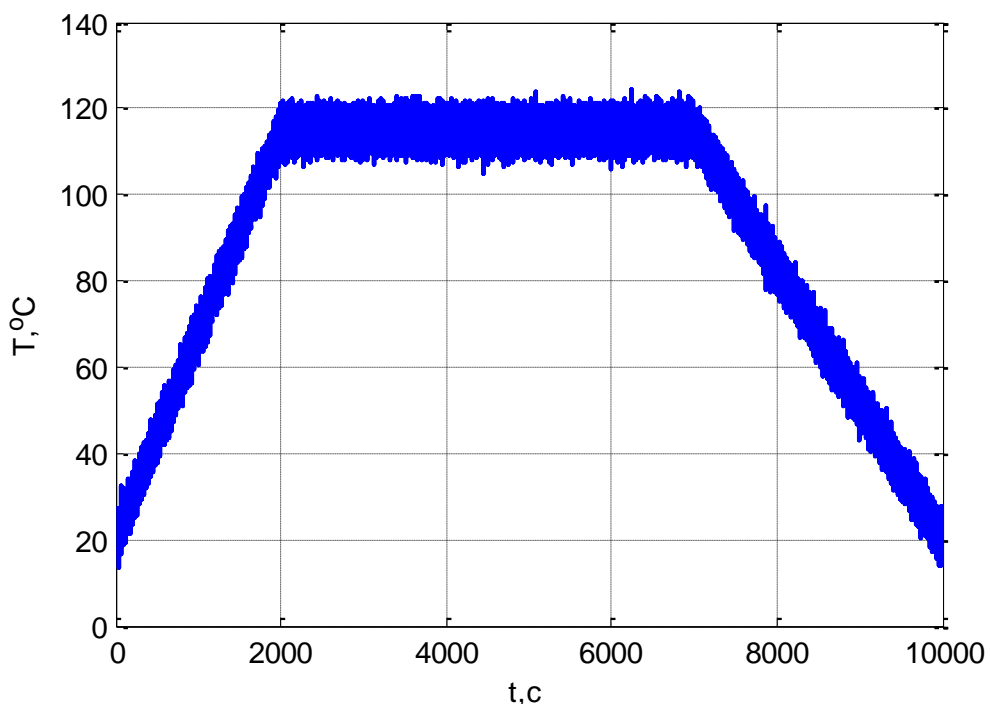


Рисунок 3.8 – Комбінація програмного сигналу та збурюючого впливу

У результаті роботи системи автоматичного регулювання температурного режиму автоклава отримано такі результати (рис. 3.9). Як видно з рисунка, температура автоклава, що є вихідним сигналом САР, майже повністю відповідає програмному сигналу. На етапах нагрівання та охолодження спостерігається незначне відставання вихідного сигналу від програмного, що становить близько 15 секунд, але це відставання є незначним у порівнянні з інерцією компонентів системи.

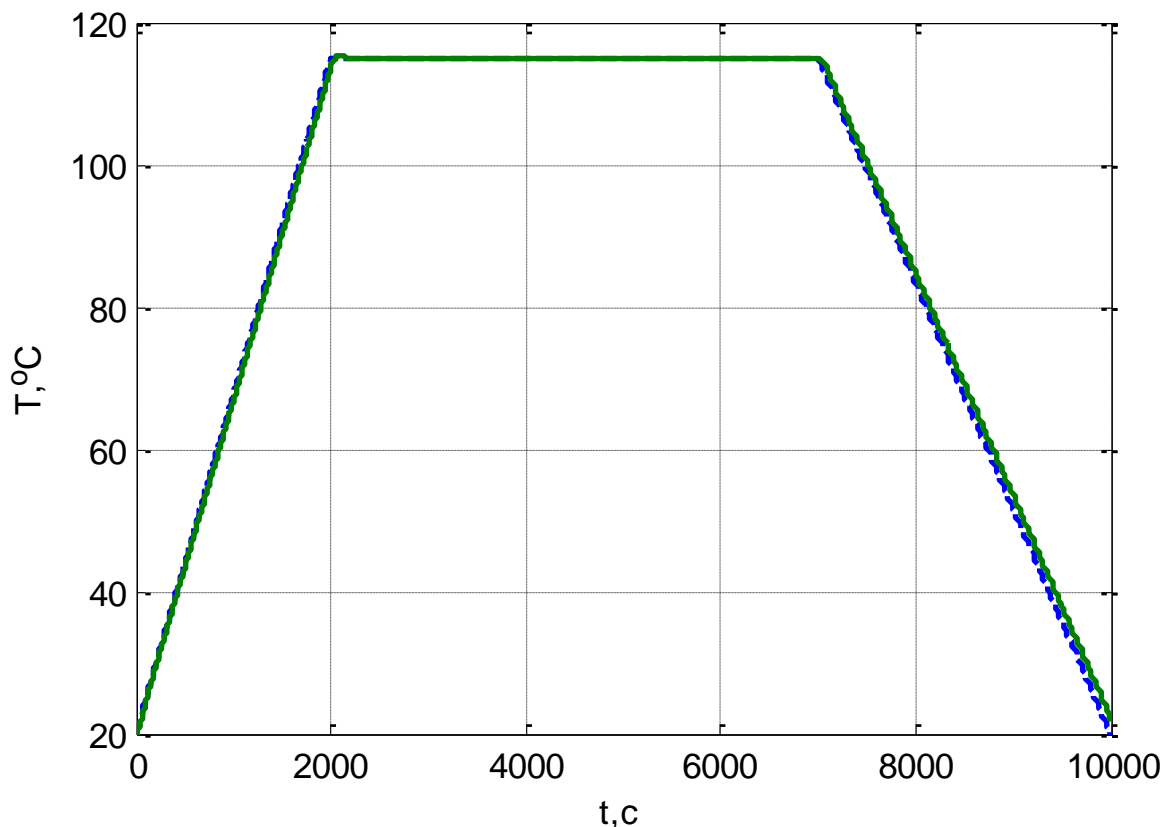


Рисунок 3.9 – Температура автоклава (вихідний сигнал) та програмний сигнал САР

Аналізуючи етап стерилізації (рис. 3.10), можна зазначити, що максимальне відхилення спостерігається лише на початку процесу, при цьому перерегулювання не перевищує $0,4 \text{ } ^\circ\text{C}$, а надалі відхилення залишаються меншими за $0,04 \text{ } ^\circ\text{C}$. Це свідчить про те, що система автоматичного регулювання дозволила знизити вплив зовнішніх збурень

більш ніж у 100 разів, при цьому запізнення системи щодо програмного сигналу не перевищує 15 секунд.

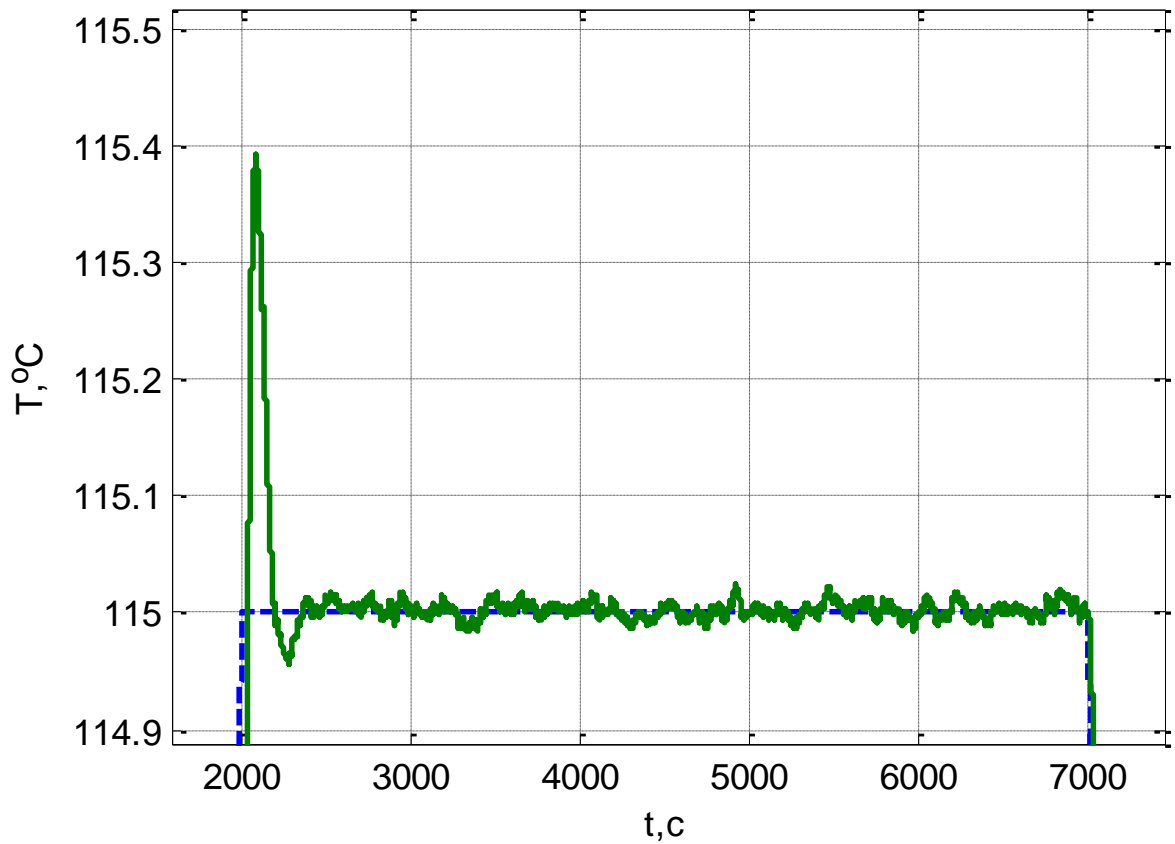


Рисунок 3.10 – Вихідний та програмний сигнали САР на етапі стерилізації

4 Практична реалізація системи автоматичного регулювання

4.1 Обчислення Z-перетворення передатної функції регулятора

Для впровадження мікропроцесорної системи регулювання необхідно виконати Z-перетворення передатної функції регулятора, отриманої в результаті синтезу в розділі 3.2.

$$W = \frac{697.837 (s + 10) (s + 0.06667) (s + 0.025)}{(s + 0.02952) (s + 11.2) (s^2 + 9.355s + 56.47)} \quad (4.1)$$

Здійснимо розкладання передатної функції регулятора на елементарні дроби.

$$W_P(s) = \frac{120.9}{s + 11.2} + \frac{-0.001861}{s + 0.02952} + \frac{577s - 570.7}{s^2 + 9.355s + 56.47} \cdot \quad (4.2)$$

Тепер здійснимо Z-перетворення за допомогою середовища MatLab при дискретизації з кроком $T_0 = 0.1$ с.

$$W_P(z) = \frac{7.271}{z - 0.3263} + \frac{-1.858 \cdot 10^{-4}}{z - 0.9971} + \frac{32.05z - 35.59}{z^2 - 1.042z + 0.3924} \cdot \quad (4.3)$$

$$W_P(z) = \frac{7.271 \cdot z^{-1}}{1 - 0.3263 \cdot z^{-1}} + \frac{-1.858 \cdot 10^{-4} \cdot z^{-1}}{1 - 0.9971 \cdot z^{-1}} + \frac{32.05 \cdot z^{-1} - 35.59 \cdot z^{-2}}{1 - 1.042 \cdot z^{-1} + 0.3924 \cdot z^{-2}} \quad (4.4)$$

На основі отриманої дискретної передатної функції регулятора формулюємо різницеві рівняння:

$$u[n] = u_1[n] + u_2[n] + u_3[n];$$

$$u_1[n] = 7.271 x[n-1] - 0.3263 u_1[n-1];$$

$$u_2[n] = -1.858 \cdot 10^{-4} x[n-1] - 0.9971 u_2[n-1];$$

$$u_3[n] = 32.05 x[n-1] - 35.59 x[n-2] - 1.042 u_3[n-1] + 0.3924 u_3[n-2];$$

Схема програмної реалізації представлена на рисунку 4.1.

Де коефіцієнти рівні:

$$a_1 = 7.271; a_2 = -0.3263; b_1 = -1.858 \cdot 10^{-4}; b_2 = -0.9971;$$

$$c_1 = 32.05; c_2 = -35.59; c_3 = -1.042; c_4 = 0.3924.$$

На основі отриманої схеми програмної реалізації потрібно побудувати регулятор, використовуючи мікропроцесор.

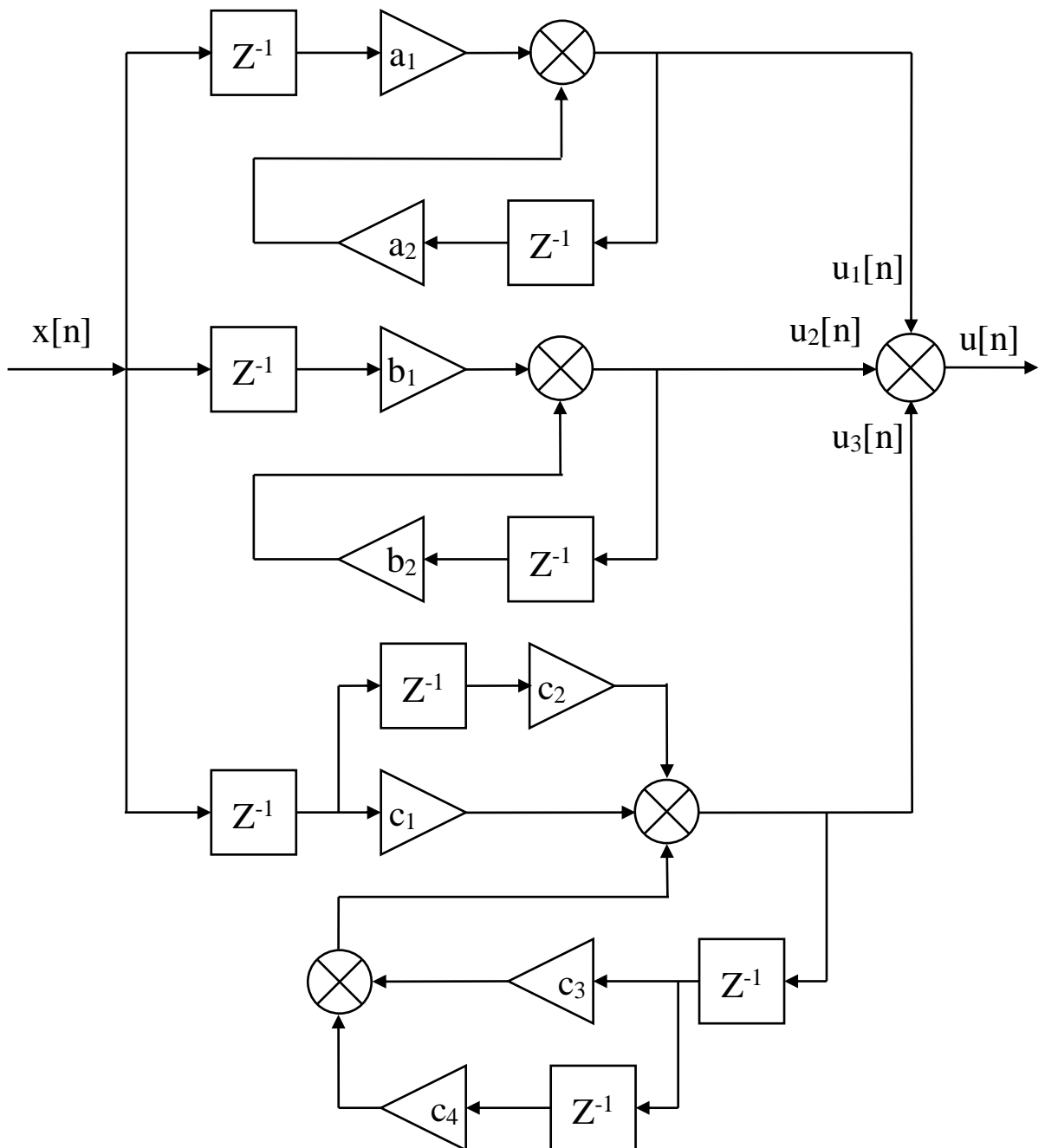


Рисунок 4.1 – Схема реалізації регулятора в програмному середовищі

4.2 Опис принципової схеми регулятора

Цифровий регулятор реалізується на основі однокристалльної мікроконтролера AVR - AT90S8515.

Цей мікроконтролер має такі особливості:

8-розрядний мікроконтролер AVR® з 8 Кбайт Flash-пам'яті, що підтримує внутрішньосистемне програмування.

Відмінні риси:

AVR® мікроконтролер з високою продуктивністю та архітектурою RISC, яка забезпечує низьке енергоспоживання. Він має 118 потужних інструкцій, більшість з яких виконуються за один такт.

Основні характеристики мікроконтролера AT90S8515:

- 8 Кбайт Flash-пам'яті з підтримкою внутрішньосистемного програмування, включаючи SPI інтерфейс для завантаження програмного забезпечення. Ресурс запису/стирання: 1000 циклів.

- 512 байт EEPROM з ресурсом 100 000 циклів запису/стирання.

- 512 байт внутрішньої SRAM.

- 32 регістри загального призначення по 8 біт.

- 32 програмовані I/O шини.

- Програмований послідовний UART і SPI інтерфейс.

- Напруга живлення (VCC): від 2.7 В до 6.0 В.

Мікроконтролер підтримує повністю статичний режим роботи з частотами:

- від 0 до 8 МГц при напрузі від 4.0 В до 6.0 В.

- від 0 до 4 МГц при напрузі від 2.7 В до 4.0 В.

Продуктивність до 8 MIPS при 8 МГц.

Також наявні:

- Один 8-розрядний таймер/лічильник з окремим попереднім дільником частоти.

- Один 16-розрядний таймер/лічильник з можливістю порівняння та захоплення.

- Подвійний ШИМ.

- Зовнішні та внутрішні джерела переривань.

- Програмовані режими зниженого енергоспоживання: Idle та Power Down.

- Вбудований аналоговий компаратор.

- Програмоване блокування для безпеки програмного забезпечення.

Мікроконтролер AT90S8515 є 8-розрядним CMOS пристроєм з низьким енергоспоживанням, заснованим на вдосконаленій AVR RISC архітектурі. Завдяки виконанню інструкцій за один такт, він досягає продуктивності до 1 MIPS на МГц, що дає можливість оптимізувати енергоспоживання в залежності від обчислювальних потреб.

Ядро AVR оснащено потужним набором інструкцій та 32 регістрами загального призначення. Усі ці регістри безпосередньо з'єднані з арифметико-логічним пристроєм (АЛП), що дозволяє одночасно працювати з двома незалежними регістрами при виконанні однієї інструкції за один такт. Завдяки такій архітектурі досягається значно вища ефективність коду, а також підвищується пропускну здатність, що може бути в 10 разів більшим порівняно зі стандартними CISC мікроконтролерами.

AT90S8515 оснащений 8 Кбайт Flash-пам'яті з підтримкою внутрішньосистемного програмування, 512 байт EEPROM, 512 байт SRAM, 32 лініями I/O загального призначення, 32 регістрами загального призначення, універсальними таймерами/лічильниками з режимами порівняння, а також внутрішніми та зовнішніми перериваннями. До того ж є програмований UART послідовного типу, програмований таймер з вбудованим тактовим генератором, програмований послідовний SPI порт та два режими економії енергії. Режим очікування «Idle Mode» зупиняє роботу CPU, але дозволяє функціонувати SRAM, таймерам/лічильникам, SPI порту та системі переривань.

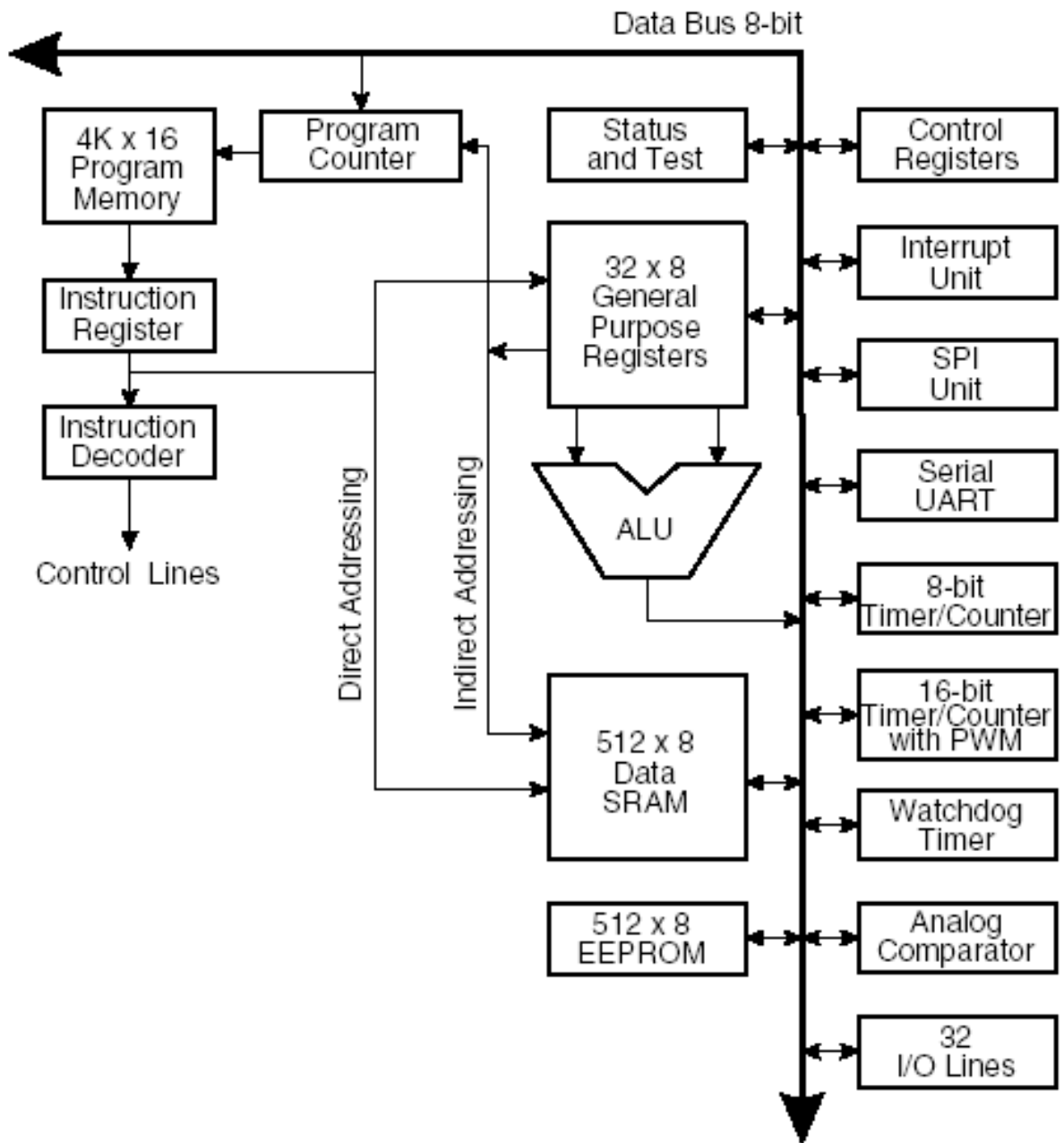


Рисунок 4.2 – Блок- схема AT90S8515

Пристрій виготовляється з використанням технології енергонезалежної пам'яті з високою щільністю, розробленої компанією Atmel. Вбудована Flash-пам'ять із підтримкою внутрішньосистемного програмування дозволяє перепрограмувати програмний код безпосередньо в системі за допомогою SPI послідовного інтерфейсу або стандартного програматора енергонезалежної пам'яті. Завдяки поєднанню вдосконаленого 8-розрядного RISC CPU та Flash-пам'яті з підтримкою внутрішньосистемного програмування на одному кристалі,

мікроконтролер AT90S8515 забезпечує високу продуктивність і є гнучким та економічно ефективним рішенням для широкого спектра систем управління.

AVR AT90S8515 підтримує широкий набір програмних засобів для розробки, зокрема: компілятори C, макроасемблери, відладчики/симулятори, внутрішньосхемні емулятори та комплекти для макетування.

Інформація з датчиків отримується через паралельний інтерфейс RS-485, реалізований за допомогою мікросхеми MAX1481 виробництва компанії MAXIM. Для опитування трьох термopідвісок використовуються три мікросхеми паралельного інтерфейсу, позначені як DD1-DD3.

Інтерфейс RS-485 (також відомий як EIA/TIA-485) є одним з найпоширеніших стандартів на фізичному рівні зв'язку. Фізичний рівень визначає канал зв'язку та метод передачі сигналу, що відповідає першому рівню моделі взаємозв'язку відкритих систем OSI.

Мережа, основана на інтерфейсі RS-485, складається з прийомопередавальних пристроїв, з'єднаних за допомогою витої пари проводів. Основу інтерфейсу RS-485 складає принцип диференціальної (балансової) передачі даних, який полягає в передачі сигналу через два проводи. Один провід (умовно А) несе оригінальний сигнал, а інший (умовно В) — його інверсну копію. Тобто, якщо на одному проводі сигнал "1", на іншому буде "0", і навпаки. Таким чином, між двома проводами витої пари завжди існує різниця потенціалів: при передачі "1" вона позитивна, при передачі "0" — негативна.

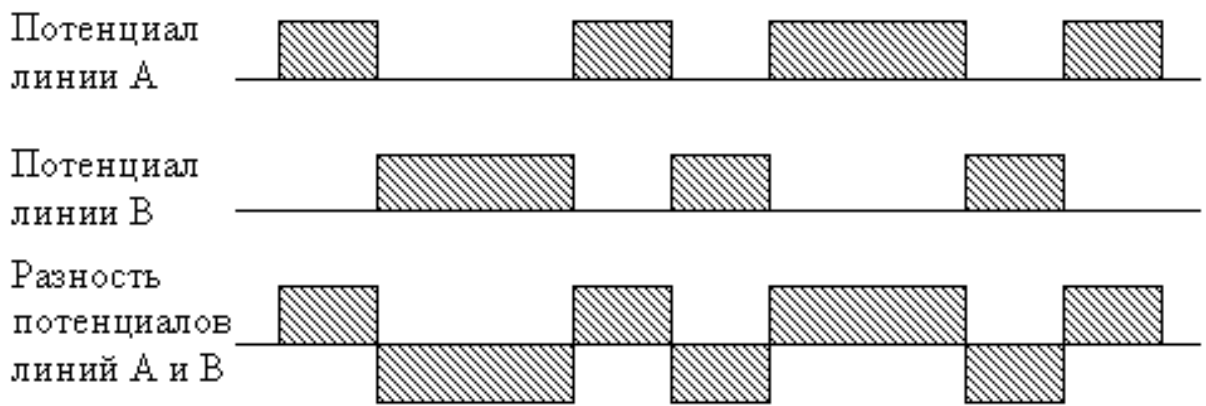


Рисунок 4.3 - Принцип балансової передачі даних

Саме різниця потенціалів між проводами і є носієм сигналу. Такий метод передачі забезпечує високу стійкість до синфазних перешкод, тобто перешкод, які впливають на обидва проводи лінії одночасно. Наприклад, електромагнітне випромінювання, проходячи через ділянку лінії зв'язку, може індукувати потенціал на обох проводах. Якщо сигнал передається як потенціал одного проводу відносно загального, як в RS-232, то наведене електричне поле може спотворити сигнал, оскільки "земля" виступає як джерело шуму. Крім того, в довгому спільному проводі може виникати різниця потенціалів, що додає додаткові шуми. Однак при диференціальній передачі сигналу це спотворення не відбувається. Коли два проводи розташовані близько один до одного, і ще й скручені, наведення на них буде однаковим. Потенціали на обох проводах змінюються синхронно, і різниця потенціалів, що містить інформацію, залишається незмінною.

Апаратна реалізація інтерфейсу включає мікросхеми прийомопередавальних пристроїв з диференціальними входами та виходами (для підключення до лінії) і цифровими портами (для підключення до портів UART контролера). Існують два варіанти такого інтерфейсу: RS-422 та RS-485.

RS-422 — це повнодуплексний інтерфейс, при якому прийом і передача сигналів здійснюються через дві окремі пари проводів. На кожній парі проводів може бути лише один передавач.

RS-485 — це напівдуплексний інтерфейс, при якому прийом і передача здійснюються по одній парі проводів з поділом за часом. У такій мережі може бути кілька передавачів, оскільки вони можуть перемикатися в режим прийому, коли не передають дані.

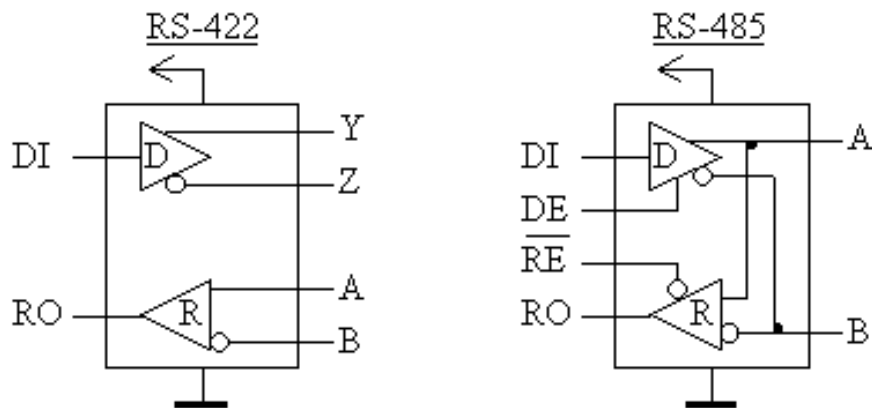


Рисунок 4.4 – блок-схема апаратної реалізації інтерфейсу.

D (driver) — передавач;

R (receiver) — приймач;

DI (driver input) — цифровий вхід передавача;

RO (receiver output) — цифровий вихід приймача;

DE (driver enable) — сигнал для включення передавача;

RE (receiver enable) — сигнал для включення приймача;

A — прямий диференціальний вхід/вихід;

B — інверсний диференціальний вхід/вихід;

Y — прямий диференціальний вихід (RS-422);

Z — інверсний диференціальний вихід (RS-422).

Розглянемо детальніше прийомопередавач RS-485. Цифровий вихід приймача (RO) підключається до порту прийому UART (RX), а цифровий вхід передавача (DI) — до порту передачі UART (TX). Оскільки приймач і передавач підключені до однієї диференціальної лінії, під час прийому потрібно відключати передавач, а під час передачі — приймач. Для цього використовуються керуючі входи — дозвіл приймача (RE) та дозвіл передавача (DE). Оскільки вхід RE є інверсним, його можна з'єднати з DE і

таким чином перемикає між режимами прийому та передачі за допомогою одного сигналу з будь-якого порту контролера. При рівні "0" активується режим прийому, а при рівні "1" — режим передачі.

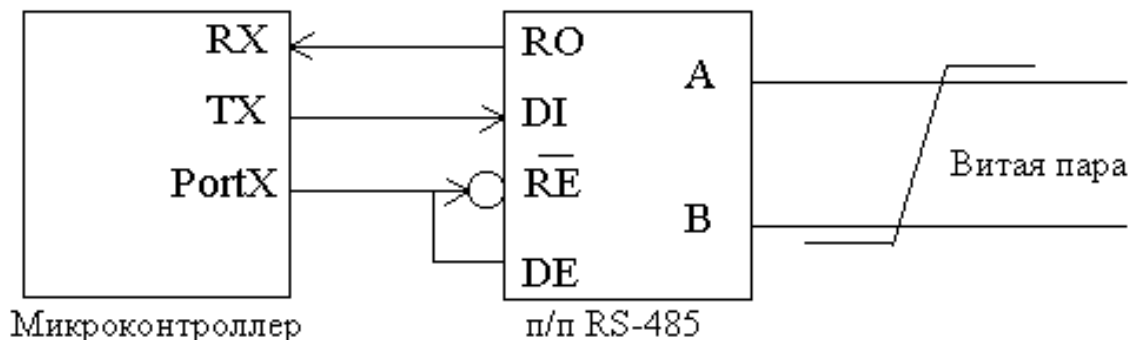


Рисунок 4.5 – Приклад з'єднання інтерфейсу RS-485 з мікроконтролером

Приймач, отримуючи різницю потенціалів (U_{AB}) на диференціальних входах (AB), перетворює її на цифровий сигнал на виході RO. Чутливість приймача може варіюватися, але точні граничні значення для розпізнавання сигналу зазвичай зазначені в технічній документації виробників мікросхем прийомопередавачів. Як правило, ці пороги складають ± 200 мВ. Тобто, коли $U_{AB} > +200$ мВ, приймач визначає "1", а коли $U_{AB} < -200$ мВ — "0". Якщо різниця потенціалів у лінії занадто мала і не виходить за ці граничні значення, коректне розпізнавання сигналу не гарантується. Окрім того, у лінії можуть виникати не синфазні перешкоди, які спотворюють слабкий сигнал.

Усі пристрої підключаються до однієї витої пари проводів однаково: прямі виходи (A) підключаються до одного проводу, а інверсні (B) — до іншого.

Вхідний опір приймача з боку лінії (R_{AB}) зазвичай становить 12 кОм. Оскільки потужність передавача обмежена, це накладає обмеження на кількість приймачів, які можуть бути підключені до лінії. Згідно зі специфікацією RS-485, з урахуванням резисторів узгодження, передавач

може керувати до 32 приймачами. Однак існують мікросхеми з підвищеним входним опором, які дозволяють підключити до лінії більше ніж 32 пристрої.

Максимальна швидкість передачі даних за специфікацією RS-485 може досягати 10 Мбіт/с, а максимальна відстань — 1200 м. Якщо потрібно організувати зв'язок на більшій відстані або підключити більше пристроїв, ніж дозволяє навантажувальна здатність передавача, використовуються спеціальні повторювачі (репітери).

Паралельний інтерфейс RS-485 також використовується для з'єднання мікроконтролера зі схемою управління ТЕНом, що дозволяє надсилати керуючі сигнали та отримувати інформацію про стан нагрівальних елементів.

Для відображення інформації про стан температури та тиску в автоклаві передбачено чотиризначний восьми сегментний індикатор, а для вибору датчика, з якого потрібно вивести дані, використовується клавіатура з 3x4 клавіш.

Оскільки система є повільнодіючою, обраний час дискретизації $T_0 = 0.1$ с цілком відповідає вимогам.

Висновки

1. У роботі здійснено огляд технології виробництва консервованих м'ясопродуктів, зокрема розглянуті методи консервування та теоретичні аспекти стерилізації консервів.

2. Розглянута конструкція автоклаву ПКС-128 та проведено його аналіз як об'єкта керування. Проаналізовано технологічний процес стерилізації та виокремлено основні етапи цього процесу. На основі цього визначено завдання для автоматизації.

3. Розроблена структурна схема системи автоматичного регулювання температурного режиму автоклава та обрані відповідні компоненти системи.

4. В результаті синтезу системи автоматичного регулювання температурного режиму автоклава отримано передавальну функцію оптимального регулятора.

5. Моделювання роботи системи автоматичного регулювання (САР) температурного режиму автоклава дозволило визначити якісні показники її роботи. Зокрема, перерегулювання в режимі стерилізації становить менше ніж $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, а подальше відхилення не перевищує $0,04\text{ }^{\circ}\text{C}$. Крім того, система автоматичного регулювання забезпечила зменшення впливу зовнішніх збурень більш ніж у 100 разів.

6. Розглянуті заходи з охорони праці, що гарантують максимальну безпеку для обслуговуючого персоналу.

Список літератури

1. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування: Підручник. – 2-ге вид., – К.: Либідь, 2007. - 656 с.
2. Автоматизація технологічних процесів і виробництв харчової промисловості: Підручник/ Ладанюк А.П., Трегуб В.Г., Ельперін І.В., Цюцюра В.Д. – К.: Аграрна освіта, 2001 – 224 с.
3. Теорія автоматичного управління: Навчальний посібник [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології кібер-енергетичних систем»; уклад.: О. Й. Штіфзон, П. В. Новіков, В.П. Бунь. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,2 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 144 с.
4. Аналіз та синтез систем автоматичного керування в MATLAB. Навчальний посібник/ О.Г. Гурко, І.Ф.Єрьоменко. – Харків: ХНАДУ, 2011. - 286 с.
5. Matlab Documentation.[Електронний ресурс]. - Режим доступу: - <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/control>.
6. Simulink Documentation [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/simulink>.
7. Теорія систем керування: підручник / В.І. Корнієнко, О.Ю. Гусєв, О.В. Герасіна, В.П. Щокін; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Дніпро: НГУ, 2017. – 497 с.
8. А.П. Ладанюк Теорія автоматичного керування технологічних об'єктів: Навч. посіб. / А.П. Ладанюк, К.С. Архангельська, Л.О. Власенко – К.: НУХТ, 2014. – 274 с.
9. Автоматизація виробничих процесів: навч. посіб. / Б. М. Гончаренко, С. І. Осадчий, Л. Г. Віхрова [та ін.]. - Кіровоград: Лисенко В.Ф., 2016. - 352 с.

10. Åström K.J., Hägglund T. Advanced PID control. – ISA (The Instrumentation, System, and Automation Society) , 2006. — 460 p.
11. Романенко В.Д. Методи автоматизації прогресивних технологій.- К.:Вища школа,1995.-519 с.
12. Стеклов В.К. Проектування систем автоматичного керування.- К.:Вища школа,1995.-231 с.
13. Технології конструювання сучасних конкурентоспроможних комплексів керування стохастичним рухом об'єктів : монографія / Л. М. Блохін та ін., Кропивницький: Лисенко В.Ф., 2023. 292 с.
14. Сільськогосподарські машини. Основи теорії та розрахунку: Підручник / Д.Г. Войтюк, В.М. Барановський, В.М. Булгаков та ін.; за ред. Д.Г. Войтюка. – К.: Вища освіта, 2005. – 464 с.
15. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці : підруч. 3-є вид., перероб і доп. Львів : УАД, 2006. 336 с.
16. Босов Є. П., Жесан Р. В., Каліч В. М., Голик О. П., Зубенко В. О. Охорона праці при проектуванні систем автоматизації виробництва : навч. посіб. 2-е вид., перероб. і доп. Кропивницький : ЦНТУ, 2022. 208 с.
17. Жидецький В. Ц., Джигирей В. С., Сторожук В. М., Туряб Л. В., Лико Х. І. Практикум з охорони праці. Львів : Афіша, 2000. 352 с.
18. Правила улаштування електроустановок : вид. офіц. Київ : Міненерговугілля України, 2017. 617 с.