

Міністерство освіти та науки України
Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем

**РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ
ПРОЦЕСОМ СТЕРИЛІЗАЦІЇ КОНСЕРВ У ПРОМИСЛОВОМУ
АВТОКЛАВІ**
**DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR THE
STERILIZATION PROCESS OF CANNED GOODS IN INDUSTRIAL
AUTOCLAVE**

спеціальність: 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Виконав: студент групи АКІТм-21
Мельник А.І.

Перевірив:

к.т.н. доц. Гуменний П.В.

Тернопіль-2023р.

РЕФЕРАТ

Робота виконана на 77 сторінках та містить 27 рисунків, 12 таблиць, 50 джерел за переліком посилань.

Мета кваліфікаційної роботи. Метою роботи є розробка автоматизованої системи управління процесом стерилізації консерв у промисловому автоклаві.

Результати роботи. Полягають у створенні програмного забезпечення для автоматизованого контролю та оптимізації процесу стерилізації консерв. Використовуючи блочну модель, розроблену систему відзначає точність та ефективність у забезпеченні оптимальних параметрів температури та тиску під час стерилізації.

Рекомендації по використанню результатів роботи. Розроблені програмні засоби рекомендується впроваджувати в промисловість для автоматизації та вдосконалення процесів стерилізації консерв. Для оптимального використання системи рекомендується провести навчання персоналу та встановити співпрацю з виробниками промислових автоклавів для інтеграції програмного забезпечення у їхні технології.

Ключові слова: АВТОМАТИЗАВАНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ, АВТОКЛАВИ, СТЕРИЛІЗАЦІЯ КОНСЕРВ.

ABSTRACT

The paper consists of 77 pages and includes 27 figures, 12 tables, and 50 references.

The objective of the qualification work. The development of an automated control system for the sterilization process of canned goods in an industrial autoclave.

The results of the work. The results involve the creation of software for automated monitoring and optimization of the canned goods sterilization process. Utilizing a block model, the developed system is noted for its accuracy and efficiency in ensuring optimal temperature and pressure parameters during sterilization.

Recommendations for the use of the results. It is recommended to implement the developed software in the industry to automate and enhance the sterilization processes of canned goods. For optimal utilization of the system, providing training for personnel is advisable. Additionally, establishing collaboration with manufacturers of industrial autoclaves is recommended for the seamless integration of the software into their technologies.

Keywords: AUTOMATED CONTROL SYSTEM, AUTOCLAVES, CANNED GOODS STERILIZATION.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1. АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ	11
1.1. Огляд предметної області та обґрунтування необхідності автоматизації процесу стерилізації консервів у харчовій промисловості	11
1.2. Основні відомості про технологічний процес стерилізації консерв.....	14
1.3. Устаткування для стерилізації консервів	18
2. СТВОРЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ СТЕРИЛІЗАЦІЇ КОНСЕРВІВ У ПРОМИСЛОВОМУ АВТОКЛАВІ.....	25
2.1. Математичний опис зміни технологічних параметрів у промисловому автоклаві	25
2.1.1 Математичний опис процесу зміни температури в автоклаві.....	29
2.1.2 Математичний опис процесу зміни тиску в автоклаві	34
2.2 Математичне моделювання процесу зміни температури і тиску в автоклаві.....	37
3. РОЗРОБКА СТРУКТУРИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ СТЕРИЛІЗАЦІЇ КОНСЕРВІВ У ПРОМИСЛОВОМУ АВТОКЛАВІ.....	47
3.1 Розробка структури керуючих пристроїв.....	47
3.2 Оцінка впливу властивостей об'єкта на вибір закону регулювання.....	55
3.3 Розробка методу розрахунку налаштувань регуляторів	62
ВИСНОВКИ.....	71
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	73
ДОДАТОК А	78
ДОДАТОК Б	79

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

САУ – система автоматичного керування

МВМ – мембранно виконавчий механізм

ЕПП – електропневматичними позиціонерами

П – пропорційний

ПД – пропорційно-диференційний

ПІ – пропорційно-інтегральний

ПІД – пропорційно-інтегрально-диференційний

ВСТУП

Актуальність теми. У сучасному світі, промисловість і виробництво продовольства вимагають впровадження високих стандартів якості та безпеки. Зокрема, стерилізація консервованих продуктів в промислових автоклавах є одним із важливих етапів у виробництві, який забезпечує тривалий термін зберігання продукції та гарантує безпеку споживачів. Проте, оптимізація та автоматизація процесу стерилізації залишаються актуальними завданнями, оскільки це дозволяє підвищити продуктивність та знизити витрати.

Розробка автоматизованої системи управління процесом стерилізації консерв у промисловому автоклаві стає насущною потребою для виробників. Основною актуальністю цієї теми є прагнення до підвищення ефективності виробництва, зменшення людського впливу на процес стерилізації та запобігання помилкам.

Мета і задачі дослідження

Ця робота ставить за мету розробити програмне забезпечення для автоматизації управління процесом стерилізації в автоклаві. Це дозволить покращити контроль над процесом, забезпечити точність та надійність, а також зменшити витрати на оплату праці та втрати продукції через людські помилки.

Для досягнення поставленої мети, ми визначили наступні завдання:

1. Провести огляд і аналіз сучасних методів стерилізації консерв та існуючих технологій управління автоклавами.
2. Розробити програмне забезпечення для автоматизованого управління процесом стерилізації, включаючи системи контролю параметрів.
3. Провести тестування розробленого програмного забезпечення та внести необхідні корективи для досягнення оптимальних результатів.
4. Розробити систему для збору та аналізу даних під час стерилізації з метою виявлення аномалій та вдосконалення процесу.

Об'єкт дослідження – процес стерилізації консерв у промисловому автоклаві.

Предмет дослідження – розробка автоматизованої системи управління цим процесом з метою покращення ефективності та якості стерилізації.

Методи дослідження

У даному дослідженні будуть використовані наступні методи: аналіз літературних джерел, розробка програмного забезпечення, моделювання та аналіз процесів, експертні оцінки та тестування.

Для створення комп'ютерних моделей застосовано теорію імітаційного моделювання та використано програмне середовище Simulink.

Наукова новизна

Науковою новизною даного дослідження є розробка програмного забезпечення для автоматизованого управління стерилізацією консерв у промисловому автоклаві з використанням засобів збору та аналізу даних для оптимізації процесу стерилізації. Модель використовує блочний принцип і описує зміну температури та тиску в автоклаві, враховуючи їх взаємозв'язок.

Практична значущість отриманих результатів

Результати цього дослідження можуть бути використані харчовими підприємствами та виробниками консерв для покращення процесу стерилізації, зменшення втрат та підвищення якості продукції. Розроблене програмне забезпечення може стати важливим інструментом для оптимізації виробництва та підвищення конкурентоспроможності на ринку.

Апробація результатів роботи

Основні положення магістерського дослідження апробовані на науково-практичній конференції молодих вчених, аспірантів та студентів «Кібербезпека та комп'ютерно-інтегровані технології» (КБКІТ - 2023), що проходив 29-31 серпня 2023 року у м. Тернополі на базі Західноукраїнського національного університету та науковому-практичному симпозіумі “Захист інформації” що проходив 30 листопада 2023 року у м. Тернополі.

Публікації

Мельник А.І., Гуменний М.В. Дослідження промислових автоклавів для стерилізації консерв. // «Кібербезпека та комп'ютерно-інтегровані технології»: Матеріали науково-практична конференції молодих вчених, аспірантів та студентів (КБКІТ - 2023), Тернопіль, 2023. - 227 с.

Мельник А.І. Інноваційні підходи до автоматизації процесу стерилізації у харчовій промисловості // “Захист інформації” : Матеріали науково - практичного симпозиуму, Тернопіль, 2023. - 195 с.

1. АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1. Огляд предметної області та обґрунтування необхідності автоматизації процесу стерилізації консервів у харчовій промисловості

Стосовно сучасних практик в харчовій промисловості, стерилізація консерв є однією з важливих процедур, без якої неможливо уявити виробництво та зберігання консервованих продуктів. У цьому розділі виокремимо значущість стерилізації для харчової промисловості та споживачів, поглянемо на відомі труднощі та виклики, пов'язані зі стерилізацією консерв у промислових автоклавах, і обґрунтуємо необхідність розробки автоматизованої системи управління для оптимізації цього важливого процесу.

Один із найбільш критичних етапів у виробництві консервів, який суттєво впливає на тривалість зберігання та якість виготовленої продукції, це процес стерилізації [1]. Однак, науково-технічна та навчально-методична література свідчать, що досліджень у глибину автоматизації процесу стерилізації, зокрема у сфері розробки систем автоматичного управління, було замало для повного вирішення цієї проблеми. Слід враховувати, що технологічний процес стерилізації консервів є особливо складним з точки зору його автоматизації.

У процесі стерилізації продукти піддаються впливу високої температури, що призводить до знищення мікроорганізмів, присутніх у продукті. Це забезпечує довгострокову стабільність консервованої продукції. Управління цим процесом (рисунок 1.1) базується на законах теплового впливу на мікробні клітини всередині продукту, і тому якість готової продукції безпосередньо залежить від якості стерилізації, що становить найскладніший і найважливіший етап у технологічному процесі консервування.



Рисунок 1.1 – Процес стерилізації консервів в автоклавах

Крім того, для успішного керування процесом стерилізації необхідно ретельно вивчити особливості змін тиску у тарі під час теплової обробки з метою точного виконання технологічних вимог та уникнення виробничого браку. Консервна галузь включає в себе безперервні, дискретні та безперервно-дискретні види виробництва, що призводить до різноманітності вимог до методів та видів автоматизації в консервному виробництві. Для розробки систем управління в цій галузі необхідно використовувати всі сучасні теоретичні і практичні методи автоматичного управління.

Автоматизація виробничих процесів може призвести до покращання не лише кількості виробленої продукції, але також її якості. Вона також може допомогти звільнити обслуговуючий персонал від небезпечних та тяжких умов праці, підвищити продуктивність машин та обладнання, зменшити витрати ресурсів, таких як пара, вода, повітря і електроенергія. Крім того, автоматизація може поліпшити санітарний стан виробництва і підвищити загальний рівень культури виробництва.

Автоматизація технологічного процесу може бути реалізована різними способами з використанням різноманітних засобів автоматики, які відрізняються за своїми властивостями, призначенням, принципом дії, конструктивним виконанням, точністю, надійністю та іншими параметрами. При цьому до автоматичних пристроїв можна віднести пристрої автоматичного контролю, системи дистанційного та автоматичного управління, пристрої сигналізації та автоматичного захисту, системи блокування та автоматичного регулювання, а також системи диспетчеризації виробництва [2].

Щоб правильно підібрати регулятор та налаштувати його параметри, необхідно мати чітке уявлення про основні характеристики об'єкта регулювання. Важливо враховувати як статичні, так і динамічні характеристики об'єкта автоматизації, які вказують, як змінюється регульований параметр з часом та які фактори впливають на ці зміни.

Завершеність та якість автоматизації виробничих процесів залежать від того, наскільки система автоматичного управління (САУ), яка застосовується, відповідає поставленим вимогам [3]. Серед цих вимог можна виділити такі аспекти:

- якість регулювання;
- можливість досягнення бажаного режиму, який максимізує продуктивність установки;
- економічна вигода від впровадження САУ;
- надійність та безпека роботи САУ;
- зручність обслуговування та можливість швидкого переналаштування системи керування на новий режим роботи;
- правильне функціонування елементів автоматики.

Отже загальна картина вказує на необхідність впровадження автоматизованої системи управління для ефективною стерилізації консерв у промисловому автоклаві. Ця система вирішує численні проблеми і виклики, пов'язані зі стерилізацією, і може стати ключовою компонентою забезпечення

якості та безпеки продуктів для споживачів. Стерилізація є фундаментальним процесом у харчовій промисловості, і її оптимізація через автоматизовану систему управління має перспективу стати важливим кроком у розвитку галузі та забезпеченні задоволення вимог споживачів.

1.2. Основні відомості про технологічний процес стерилізації консерв

Процес стерилізації відноситься до термічної обробки продукту з метою придушення життєдіяльності мікроорганізмів при використанні температур вище 100°C. Використання термічної стерилізації є ключовим етапом в консервному виробництві, яке гарантує довготривале збереження консервів. В процесі стерилізації майже повністю знищуються мікроорганізми та створюються умови, що заважають подальшому росту залишкових мікроорганізмів. Повністю стерильні консерви можуть бути досягнуті за допомогою високих температур стерилізації (до 180°C) або тривалої стерилізації, але це може вплинути на властивості продукту та знизити його харчову цінність. Під час стерилізації потрібно також забезпечити збереження смакових якостей продуктів та вмісту вітамінів. Термічна стерилізація продовжує бути основним та надійним методом консервації харчових продуктів, відкритим французьким науковцем Н. Аппером понад 150 років тому [4, 5].

При стерилізації консервів два основних фактори грають важливу роль: температура та тривалість теплового впливу. Вища температура стерилізації сприяє швидшому знищенню мікроорганізмів, але вимагає менше часу. Навпаки, тривалість впливу температури, необхідна для знищення мікроорганізмів при даній температурі стерилізації, називається "смертельним часом". Цей параметр залежить від ряду факторів, таких як температура

стерилізації, характеристики продукту, матеріали тари, тип та кількість мікроорганізмів у продукті [6, 7].

На жаль, на виробництві часто відсутні засоби для безпосереднього вимірювання температури продукту всередині консервної банки. Тому управління процесом стерилізації зазвичай відбувається на основі температури теплоносія, такого як вода, пара чи повітря. Умовний запис процесу стерилізації консервів в автоклаві, де відбувається сам процес, називається "формулою стерилізації". Для автоклавів, які використовуються на виробництві, кожен цикл стерилізації розпочинається зі нагрівання води в автоклаві до температури стерилізації, потім йде сама стерилізація продукту та завершується охолодженням до температури (30-40°C). Це дозволяє знизити тиск і виконати розвантаження автоклаву. Умовний запис формули стерилізації для консервів у воді з протитиском має вигляд [8]:

$$\frac{A - B - C}{\Theta} P \quad (1.1)$$

Формула для процесу стерилізації в умовах наявності пароповітряного середовища з протитиском:

$$\frac{a - A - B - C}{\Theta} P \quad (1.2)$$

Де a – час, протягом якого відбувається видування повітря з автоклава парою, в хвилинах; A – час підігріву теплоносія в автоклаві від початкової температури до заданого рівня, в хвилинах; B – тривалість стерилізації при заданій температурі, в хвилинах; C – час охолодження, необхідний для зниження температури та тиску в автоклаві до рівня, який дозволяє провести розвантаження, в хвилинах; Θ – температура теплоносія під час стерилізації, в градусах Цельсія; P – протитиск, що створюється в автоклаві для компенсації внутрішнього тиску в банках під час стерилізації, в кілопаскалях. Величина необхідного протитиску обчислюється як сума цих компонентів [9]:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 \quad (1.3)$$

Де P_1 вказує на тиск пари води в кілопаскалях (кПа), P_2 на тиск повітря також в кілопаскалях (кПа), P_3 на тиск газів в кілопаскалях (кПа), та P_4 на тиск продукту в кілопаскалях (кПа).

Протитиск визначається шляхом додавання тиску пари води або пара, який формується від надлишкового повітря, що надходить до автоклава. Цей протитиск створюється з метою запобігання деформації банок або викиданню кришок із скляних банок [10].

Графіки на Рисунку 1.2 відображають зміну температури протягом технологічного процесу [11]. За часом температура в банках розвивається інакше, ніж температура середовища всередині автоклава. Підвищення температури в продукті відстає від зростання температури навколишнього середовища в автоклаві, і при неправильних режимах, може навіть перевищити задані значення. Це відставання в значній мірі залежить від швидкості прогрівання продукту. Зазвичай рідка частина продукту, де тепло передається за допомогою конвекції, прогрівається швидше. Для твердої частини продукту характерне більше відставання, оскільки тепло передається переважно за допомогою теплопровідності [12].

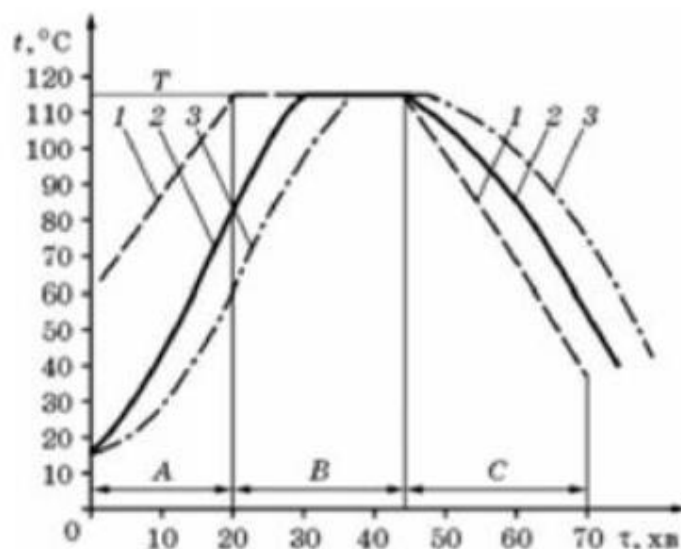


Рисунок 1.2 – Графіки зміни температури у процесі стерилізації

1 – зміна температури теплоносія; 2 – зміна температури рідкої складової продукту в центрі банки; 3 – зміна температури щільної складової продукту в центрі банки; А – тривалість періоду нагрівання продукту; В – тривалість періоду стерилізації продукту; С – тривалість періоду охолодження продукту холодною водою; а – початок процесу стерилізації; (b – c) – тривалість витримки продукту при заданій температурі; d – період охолодження продукту.

Під час процесу стерилізації температура продукту у консервах постійно змінюється, і ця зміна неоднакова в різних частинах банки. У більш віддаленій від центру частині банки нагрівання відбувається швидше, ніж у її центральній частині, де процес розгортання температури відбувається повільніше. Оскільки температура в "холодній" точці залежить від температури гріючого середовища, графік прогріву цієї критичної точки тісно пов'язаний з графіком зміни температури гріючого середовища в автоклаві [13,14, 15].

Автоклави не досягають заданої робочої температури відразу після початку подачі пари. Для цього потрібно певний час А, який визначає період підготовки системи до досягнення кінцевої робочої температури. При дослідженні впливу цього періоду було встановлено, що 42% загального часу можна вважати часом витримки за робочої температури. Значення параметра А приймають як певне вихідне значення. Для стерилізації бляшанок об'ємом до 1,0 кг, А складає 20 хв, і для більших банок - 30 хв. Для скляних банок об'ємом 0,5 кг, А дорівнює 25 хв, а для банок об'ємом 1 кг - 30 хв [11].

Момент початку охолодження продукту відрізняється від початку охолодження гріючого середовища в автоклаві. Значення параметра С визначається необхідністю вирівнювання тиску в банці до атмосферного рівня, оскільки під час вивантаження з автоклава тиск у банці не повинен перевищувати допустимого максимуму, інакше можлива незворотна деформація металеві банки або відкриття кришки зі скляним контейнером.

В окремих випадках, коли продукту не вистачає часу для охолодження за допомогою параметра C , застосовується додаткове охолодження холодною водою при атмосферному тиску.

Тиск всередині банки під час стерилізації складається з часткових тисків водяної пари, повітря і газів, що виділяються з продукту і заповнюють вільний об'єм банки, а також тиску, який виникає внаслідок розширення продукту в банці - формула (1.3). Розмір вільного об'єму залежить від коефіцієнта заповнення банки, ступеня розширення продукту через нагрівання та збільшення об'єму банки через термічний розширення матеріалу, з якого вона виготовлена.

Коефіцієнт заповнення банки встановлюється інструкціями, які регулюють масу продукту в банці. Його значення різняться для різних видів продуктів. У випадку скляних банок ступінь розширення об'єму банки завжди менший, ніж ступінь розширення продукту через нагрівання, і, отже, коефіцієнт заповнення повинен бути менший, ніж для бляшанок [11].

Ступінь розширення продукту, пари та газів в середині банки завжди перевищує розширення банки, тому тиск у банці під час стерилізації перевищує тиск в автоклаві, створений парою. Чим вища температура стерилізації, тим більша різниця між ступенем розширення банки і внутрішнім тиском. Це може призводити до деформації банок. Тому допустима різниця між тиском в автоклаві та тиском всередині банки не повинна перевищувати певну критичну величину.

1.3. Устаткування для стерилізації консервів

Більшість пристроїв та машин у харчовій промисловості є засобами для перетворення харчових середовищ. Велика частина цього обладнання включає пристрої для проведення тепломасообмінних процесів. Як вже зазначалося,

для забезпечення довгострокового зберігання консервів необхідно їх стерилізувати, що призводить до інактивації мікроорганізмів всередині банок із продуктом. Теплову обробку продукції при температурі до 100 °С називають пастеризацією, в той час як при температурі понад 100 °С - стерилізацією. Остання проводиться під підвищеним тиском всередині автоклава.

Стерилізатори і пастеризатори відносяться до пристроїв для теплової обробки харчових продуктів з подальшою зберіганням їх при певній температурі. Це обладнання спричиняє складні фізико-хімічні та структурно-механічні зміни, пов'язані з теплопередачею в продукт через поверхневе або об'ємне нагрівання, з метою знищення мікроорганізмів та запобігання їх розвитку в продукті. Проте цей процес також призводить до змін агрегатного та структурного стану продукту, розм'якшення рослинних тканин, що сприяє їх руйнуванню та вивільненню необхідних речовин. Ці аспекти важливі під час технологічного процесу.

Існують безперервно працюючі та періодично діючі апарати для стерилізації харчових продуктів (рисунок 1.3) [16].

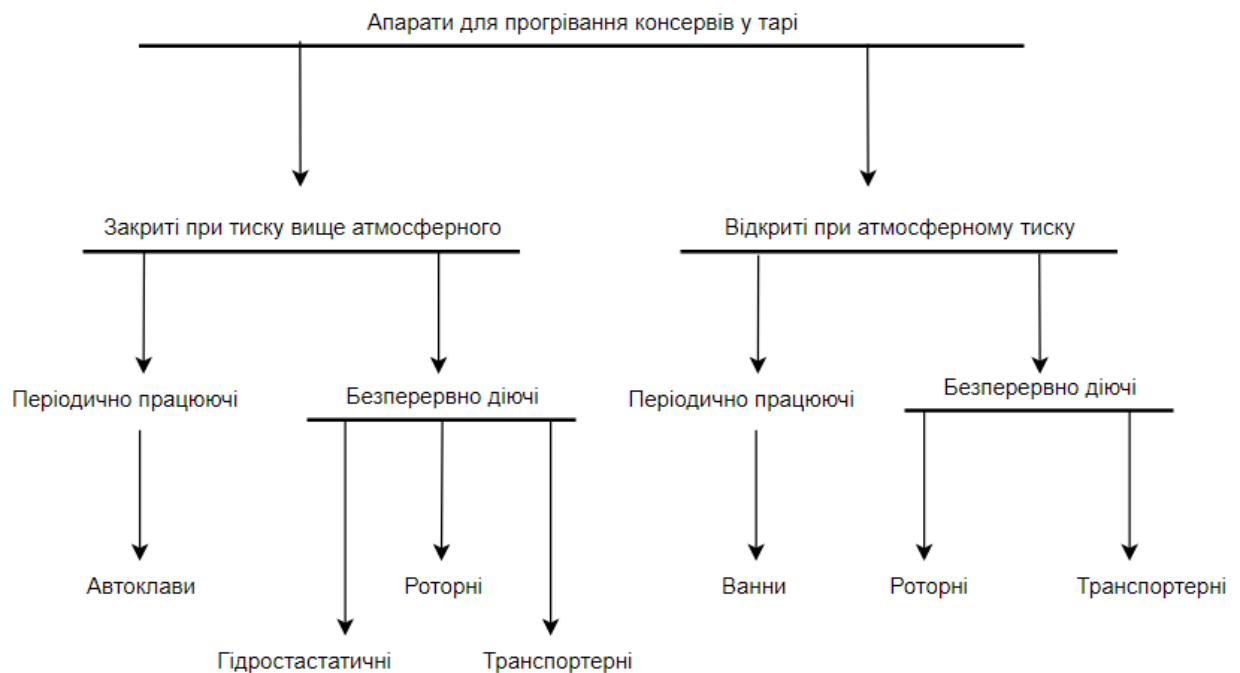


Рисунок 1.3 – Класифікація обладнання для пастеризації та стерилізації консервів

Апарати відкритого типу рідко використовуються в промисловості. Зазвичай вони використовуються для пастеризації соків у скляних пляшках з корончастими кришками та консервування томатних продуктів у бляшаній тарі. Для великих виробництв, які виготовляють великі партії однотипної продукції, використовуються безперервні установки, які можна розділити на три типи: роторні установки, установки із гідростатичним тиском та установки з пластинчастим транспортером.

У роторних стерилізаторах безперервної дії [6], банки, разом з ротором, обертаються та переміщуються, коли рухаються до пункту вивантаження, керуючись спіраллю. Крім того, ковзаючи по дну корпусу, банки залучаються до обертального руху навколо своєї осі завдяки терню. Таким чином, стерилізовані банки беруть участь у трьох видів руху, що прискорює процес прогріву. Однією з особливостей цього процесу стерилізації є відсутність необхідності підвищувати температуру в стерилізаторі, оскільки температура залишається постійною для конкретного продукту та режиму стерилізації. При введенні банки в стерилізатор, вони одразу піддаються максимальному температурному перепаду. Під час руху банок, що нагріваються, процес нагрівання інтенсифікується, а тривалість стерилізації скорочується.

Переваги порівняно з автоклавами періодичної дії включають [8]:

- скорочення часу стерилізації;
- спрощений контроль над режимом стерилізації;
- покращення смаку та зовнішнього вигляду окремих видів консервів, таких як паштети та інші схожі продукти, завдяки рівномірному розподілу жиру та рідкої фази під час стерилізації.

До недоліків роторних безперервних стерилізаторів можна віднести:

- необхідність обладнання агрегатів складними механізмами для переміщення банок між середовищами з різним тиском;
- знос деталей внаслідок тертя, що може викликати витік пари;
- обмежену можливість стерилізувати банки лише одного розміру та типу.

Цей останній недолік не є характерним для гідростатичних безперервних стерилізаторів [8]. Вони дозволяють вводити банки з однієї середовища в інше через гідростатичний затвор, який в цьому випадку служить як стовп води, і обходити використання шлюзових затворів. Проте всі безперервні гідростатичні стерилізатори обмежені можливістю стерилізації лише банок одного розміру та великих габаритів (до 40 метрів) через необхідність створення протитиску, необхідного для стерилізації банок у скляній тарі.

Висоту гідростатичного стерилізатора можна скоротити з 35-40 метрів до 5-7 метрів за рахунок поступового підвищення тиску від атмосферного до необхідного значення для стерилізації консервів. В цьому випадку корпус агрегату поділяється на відсіки, де тиск відрізняється на постійну величину. Також можливо закріплювати кришку на горловині стерилізованої скляної банки за допомогою спеціальних термомеханічних або механічних фіксаторів. Але це може призвести до ускладнення конструкції стерилізатора і створити додаткові труднощі під час його обслуговування та експлуатації.

Переважна кількість консервних заводів використовує автоклави періодичної дії, які працюють з протитиском, оскільки ця технологія дозволяє стерилізувати продукцію, упаковану у банки різних типів [11]. Апарати, що працюють за періодичним принципом, можна поділити на горизонтальні та вертикальні.

Вертикальний автоклав має циліндричну форму і встановлюється вертикально в спеціальне поглиблення підлоги. Для завантаження кошиків з банками в автоклав використовується монорейка з підйомним механізмом.

Корпус горизонтального автоклава також має циліндричну форму, але встановлюється горизонтально на підставки. Візки з банками в горизонтальній автоклав заковчуються по рейках з одного боку, і продукція вивозиться з іншого. Для прискорення процесу прогрівання продукту в горизонтальних автоклавах іноді використовують обертання кошиків, що сприяє рівномірному проникненню тепла до центру банок.

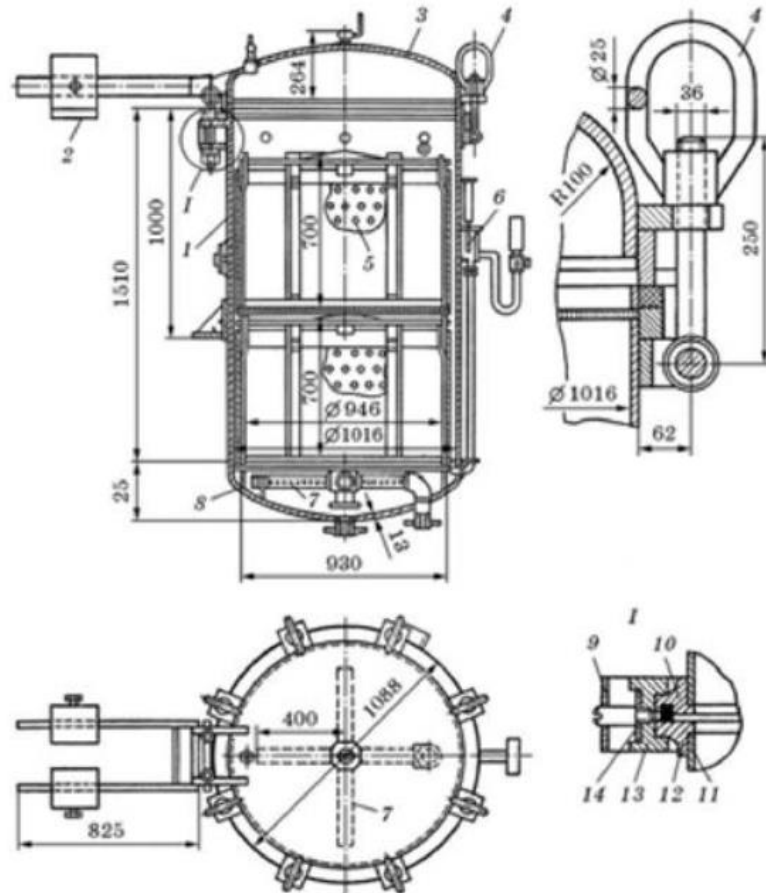


Рисунок 1.4 – Схема вертикального автоклава

Однак горизонтальні автоклави мають недоліки, такі як значна зайнятість простору та складнощі у стерилізації консервів. Крім того, ступінь використання об'єму горизонтального автоклава менший, ніж у вертикального автоклава.

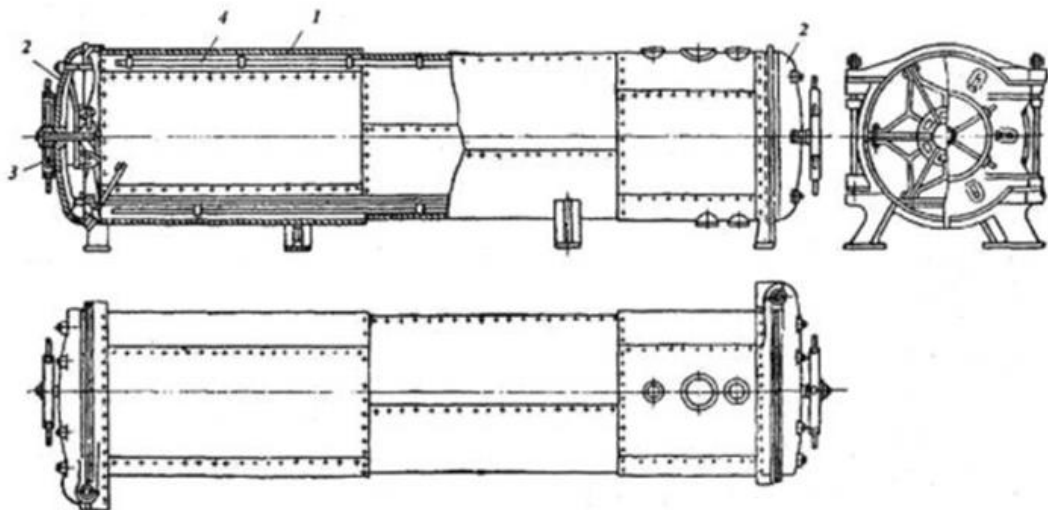


Рисунок 1.5 – Схема горизонтального автоклава

До недоліків автоклавів періодичної дії входять:

- складність управління процесом без автоматизації;
- важкість завантаження та вивантаження апарату;
- високі вимоги до обслуговування;
- постійні стадії роботи;
- тривалість циклу стерилізації;
- великий відсоток браку продукції при низькій автоматизації

Засоби механізації та автоматизації можуть компенсувати більшість недоліків, характерних для апаратів періодичної дії. Автоматизація цих стерилізаторів може бути здійснена різними способами, використовуючи різноманітні засоби автоматики. Ці засоби відрізняються за властивостями, призначенням, принципом дії, конструктивним оформленням, точністю, надійністю та іншими характеристиками. Автоматизація автоклавів періодичної дії, як видно з вищесказаного, є складним завданням, але водночас вкрай актуальним у сучасний період.

Магістерська робота присвячена розробці та впровадженню автоматизованої системи управління процесом стерилізації консерв у промисловому автоклаві. Ця тема виокремлюється як важлива у сфері харчового виробництва та підприємств, які спеціалізуються на консервуванні продукції.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати ряд ключових завдань:

1. Аналіз існуючих технологій стерилізації консерв. Провести огляд та аналіз існуючих методів та технологій стерилізації, оцінити їх переваги та недоліки.
2. Розробка програмного забезпечення для управління стерилізацією. Розробити програмне забезпечення, яке буде відповідати потребам промислового процесу стерилізації консерв. Це включає в себе створення інтерфейсу для контролю та моніторингу процесу, а також можливості збору та аналізу даних.

3. Інтеграція обладнання та програмного забезпечення. Забезпечити взаємодію програмного забезпечення з обладнанням автоклаву для забезпечення ефективного управління процесом стерилізації.
4. Тестування та оптимізація системи. Провести тестування розробленої системи в умовах реального виробництва та оптимізувати її ефективність.
5. Підготовка до впровадження. Розробити план впровадження автоматизованої системи на виробництві та забезпечити навчання персоналу.

2. СТВОРЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ СТЕРИЛІЗАЦІЇ КОНСЕРВІВ У ПРОМИСЛОВОМУ АВТОКЛАВІ

2.1. Математичний опис зміни технологічних параметрів у промисловому автоклаві

Автоклав представляє собою складний об'єкт, в якому відбуваються два взаємопов'язані процеси: зміна температури та зміна тиску. На відмінну від простих теплообмінних апаратів, які лише передають тепло від теплоносія до продукту, тепловий процес у автоклаві супроводжується необхідним надлишковим тиском. Отже, автоклав як об'єкт автоматизації має дві взаємопов'язані регульовані величини.

Було проведено дослідження автоклаву як об'єкта автоматизації, і найбільш повні результати в цій галузі представив Б.Є. Щокін [17].

Під час стерилізації консервів у скляній тарі основною акумулюючою теплоємністю є вода, і теплову ємність пароповітряного середовища можна ігнорувати. Відповідно до цього, з точки зору теплообміну, автоклав можна розглядати у трьох варіантах [18]:

- Враховується лише теплова ємність води та продукту в банках, і тепловою ємністю корпусу нехтуємо (див. рисунок 2.1 а).
- Враховується теплова ємність води, продукту та корпусу автоклаву, а також температура корпусу приймається рівною температурі води в автоклаві (див. рисунок 2.1 б).
- Враховується теплова ємність води, продукту та корпусу автоклаву, при цьому температура корпусу відрізняється від температури води (див. рисунок 2.1 в).

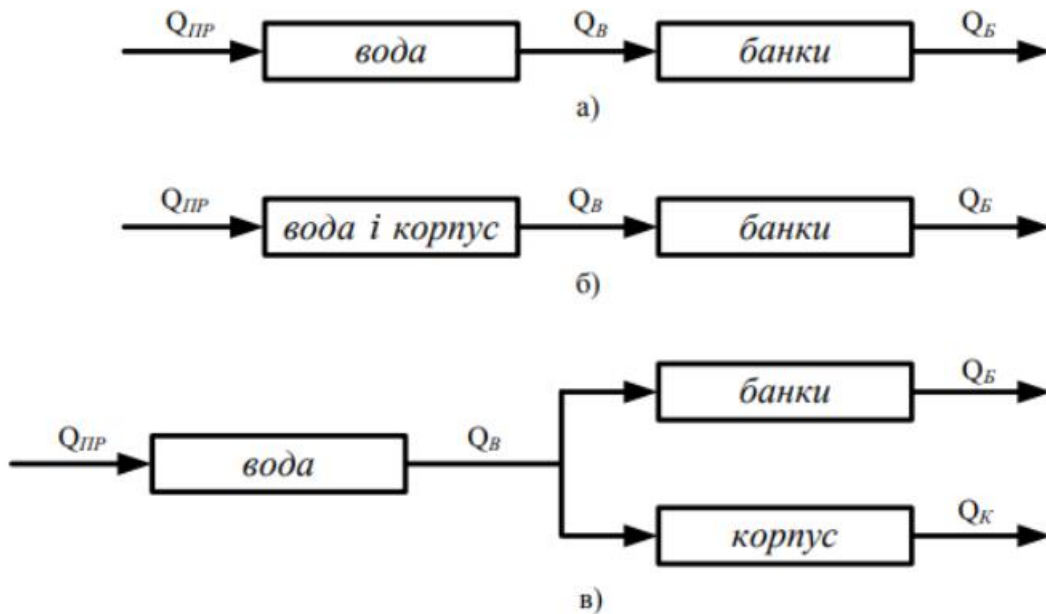


Рисунок 2.1 – Схема теплообміну в автоклаві залежно від типу теплових ємностей

$Q_{\text{ГП}}$ – кількість тепла, що передається в автоклав;

$Q_{\text{В}}$ – кількість тепла переданого теплоносію (вода) в автоклаві;

$Q_{\text{Б}}$ – кількість тепла продукту, що передається в банки;

$Q_{\text{К}}$ – кількість тепла переданого корпусу(стінкам) автоклава

Хоча багато дослідників підтверджують [18,19,17], що розгляд автоклава як об'єкта зі сконцентрованими параметрами, зображеного на рисунку 2.1б, є припустимим і дає надійні результати завдяки відносно простому математичному опису, автор вважає, що останній варіант, представлений на рисунку 2.1в, найкраще відповідає фізичній природі теплообмінних процесів, які відбуваються в автоклаві [20].

Щодо теплових процесів всередині консервних банок, ми розглядаємо автоклав як об'єкт із сконцентрованими параметрами, як показано на рисунку 2.2, і не розглядаємо теплові процеси всередині самих банок, як це підтверджено в роботах [1, 21, 22, 23].

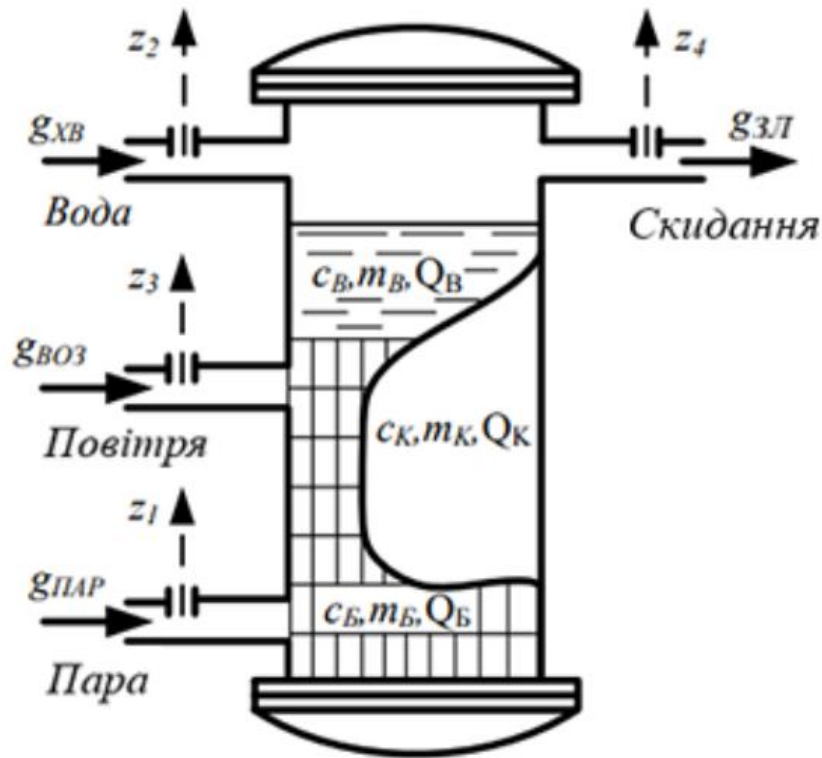


Рисунок 2.2 – Розрахункова схема вертикального автоклава при стерилізації парю з протитиском консервів у скляній тарі

Q_B – кількість тепла, що передається теплоносія (воді) в автоклаві;

Q_B – кількість тепла, що передається продукту в банках;

Q_K – кількість тепла, переданого корпусу автоклава;

m_B – маса води в автоклаві;

m_B – маса продукту у банках;

m_K – маса корпусу автоклаву;

C_B – питома теплоємність води;

C_B – питома теплоємність продукту в банках;

C_K – питома теплоємність сталі корпусу автоклаву;

z – хід плунжера відповідного регулюючого клапана (виконавчого механізму);

g_{XB} – масова витрата холодної води;

$g_{ПАР}$ – масова витрата пари;

$g_{ЗЛ}$ – масова витрата пароповітряної суміші через зливний клапан;

$g_{ПОВ}$ – масова витрата повітря.

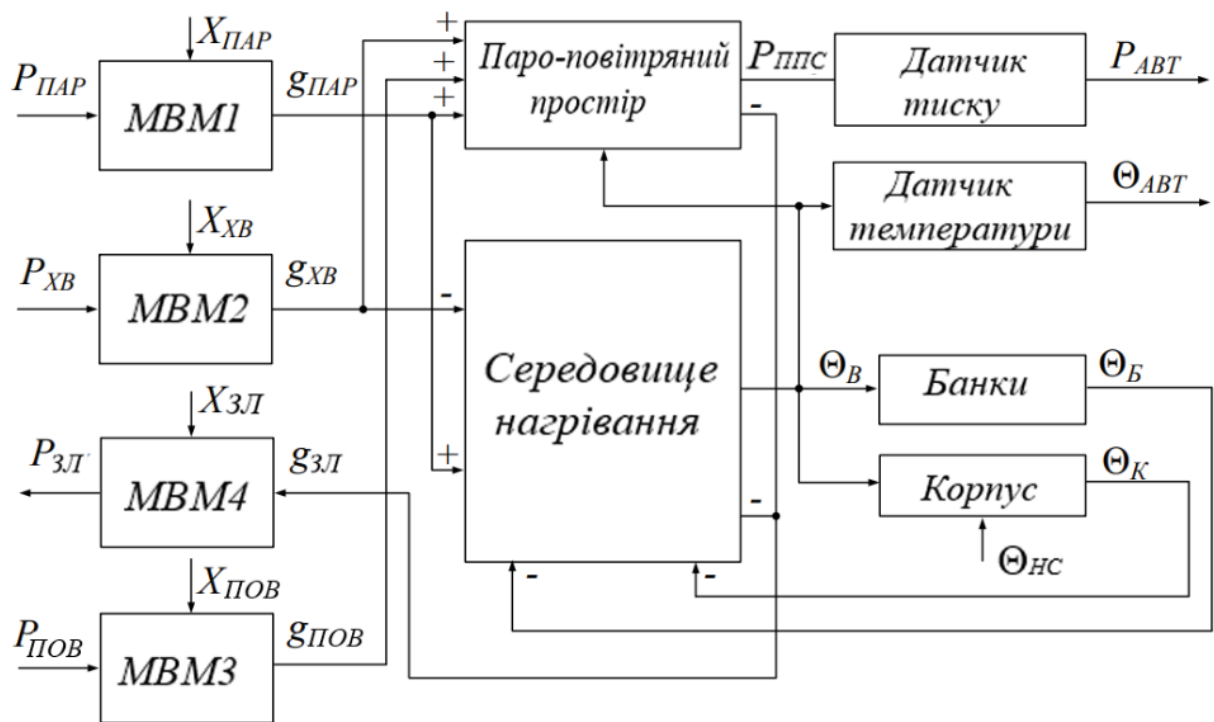


Рисунок 2.3 – Структурна схема моделі технологічного процесу стерилізації консервів в автоклаві

На малюнку 2.3 представлена схема структури імітаційної моделі процесу стерилізації консервів у воді, яку підігріває пара. У структурній схемі (рисунок 2.3) присутні наступні позначення:

$P_{ПАР}$ – тиск у паровій магістралі, вимірюється в МПа;

$P_{ХВ}$ – тиск у магістралі холодної води, вимірюється в МПа;

$P_{ЗЛ}$ – тиск у магістралі для зливу пароповітряної суміші, вимірюється в МПа;

$P_{ПОВ}$ – тиск у магістралі для подачі повітря, вимірюється в МПа;

МВМ - мембранний виконавчий механізм, також відомий як регулюючий клапан;

X – сигнал керування виконавчим механізмом;

$g_{ПАР}$ – масова витрата пари, вимірюється в кг/с;

$g_{ХВ}$ – масова витрата холодної води, вимірюється в кг/с;

$g_{зл}$ – масова витрата пароповітряної суміші через зливальний клапан, вимірюється в кг/с;

$g_{пов}$ – масова витрата повітря, вимірюється в кг/с;

$R_{ппс}$ – тиск пароповітряної суміші в автоклаві, вимірюється в Па;

Θ_B – температура води в автоклаві, вимірюється в градусах Цельсія ($^{\circ}\text{C}$);

Θ_B – температура банок, вимірюється в градусах Цельсія ($^{\circ}\text{C}$);

Θ_K – температура корпусу автоклава, вимірюється в градусах Цельсія ($^{\circ}\text{C}$);

$\Theta_{нс}$ – температура навколишнього середовища, вимірюється в градусах Цельсія ($^{\circ}\text{C}$);

$R_{авт}$ – повний тиск в автоклаві, вимірюється в Па;

$\Theta_{авт}$ – температура в автоклаві, вимірюється в градусах Цельсія ($^{\circ}\text{C}$).

2.1.1 Математичний опис процесу зміни температури в автоклаві

Рівняння балансу теплової енергії в автоклаві під час стерилізації консервів у воді, яка нагрівається парою, для дуже малих інтервалів часу dt може мати такий вигляд [24]:

$$g_{пар}r - g_{хв}c_B (\Theta_B - \Theta_{хв}) - g_{зл}\Theta_B c_B - q_{вит} - q_B - q_K = m_B c_B \frac{d\Theta_B}{dt}, \quad (2.1)$$

$g_{пар}$ – масова витрата пари, через регулюючий клапан, кг/с;

$g_{хв}$ – масова витрата холодної води, через регулюючий клапан, кг/с;

$g_{зл}$ – масова витрата пароповітряної суміші через зливальний регулюючий клапан, кг/с;

g_B – тепловий потік до банок, які стерилізуються, Дж/с.

g_K – тепловий потік до корпусу автоклава, Дж/с.

$g_{ВИТ}$ – теплові витрати корпусу автоклава, Дж/с.

Θ_B – температура води в автоклаві, (°C);

Θ_{XB} – температура холодної води, (°C);

Θ_B – зміна температури гріючого середовища протягом часу dt .

r – питома теплота пароутворення, Дж/кг;

c_B – питома теплоємність води, Дж/(кг °C);

m_B – маса води в автоклаві, кг.

Тепловий потік, що направлений до банок [17]:

$$q_B = \alpha_{BB} F_B (\Theta_B - \Theta_B) \quad (2.2)$$

α_{BB} – коефіцієнт тепловіддачі вода-банка, Дж/(м² з °C);

F_B – площа зовнішніх поверхонь всіх банок, м²;

Θ_B – температура банок, °C.

Тепловий потік, що направлений в корпус автоклава:

$$q_K = \alpha_{BC} F_K (\Theta_B - \Theta_K) \quad (2.3)$$

α_{BC} – коефіцієнт тепловіддачі вода-сталь, Дж/(м² з °C);

F_K – площа поверхні корпусу автоклава, м²;

Θ_K – температура корпусу автоклава, °C.

Тепловий потік, що направлений в навколишнє середовище:

$$q_{ВИТ} = \alpha_{CB} F_K (\Theta_K - \Theta_{НС}) \quad (2.4)$$

α_{CB} – коефіцієнт тепловіддачі сталь-повітря, Дж/(м² з °C);

$\Theta_{НС}$ – температура навколишнього середовища, °C.

Збільшення температури банок [25]:

$$d\Theta_B = \frac{q_B}{m_B c_B} dt \quad (2.5)$$

$d\Theta_B$ – збільшення температури банок, °С;

m_B – маса банок, кг;

c_B – питома теплоємність банок, Дж/(кг °С).

Збільшення температури корпусу автоклаву:

$$d\Theta_K = \frac{q_K - q_{ВИГ}}{m_K c_K} dt \quad (2.6)$$

$d\Theta_K$ – збільшення температури корпусу автоклава, °С;

m_K – маса корпусу автоклава, кг;

c – питома теплоємність сталі корпусу автоклава, Дж/(кг °С).

З врахуванням зазначених вище умов та здійснюючи подальше уточнення наших припущень, було розширено структурну схему каналу регулювання температури, представленої на рисунку 2.4. Це поглиблене дослідження дозволило ще більш детально вивчити внутрішні взаємозв'язки та взаємодії між ключовими компонентами системи під час проведення процесу стерилізації консервів у воді. Крім того, у розширеній таблиці 2.1, наведеній нижче, було включено числові значення констант, які зумовлюють функціонування вдосконаленої структурної схеми. Цей підхід дозволяє ще глибше проникнути в суть процесу регулювання температури в автоклаві під час стерилізації консервів у воді, забезпечуючи високий рівень деталізації та повноти наукових досліджень.

Таблиця 2.1 - Числові значення констант у структурній схемі

Назва константи	Буквенне позначення	Одиниці вимірювання	Значення
Температура води в автоклаві початкова	Θ_{B0}	°C	75
Температура холодної води	Θ_{XB}	°C	20
Температура банок початкова	Θ_{B0}	°C	70
Температура навколишнього середовища	Θ_{HC}	°C	25
Температура корпусу автоклаву початкова	Θ_{K0}	°C	25
Площа зовнішніх поверхонь всіх банок	F_B	м ²	38,7
Площа поверхні корпусу автоклава	F_K	м ²	8,4
Маса води в автоклаві	m_B	кг	1160
Маса банок	m_B	кг	461,1
Маса корпусу автоклаву	m_K	кг	1210
Питома теплоємність води	c_B	Дж/(кг °C)	4190
Питома теплоємність банок з продуктом	c_B	Дж/(кг °C)	3680
Питома теплоємність сталі корпусу автоклава	c_K	Дж/(кг °C)	480
Коефіцієнт тепловіддачі вода-банку	α_{BB}	Дж/(м ² з °C)	1450
Коефіцієнт тепловіддачі вода-сталь	α_{BC}	Дж/(м ² з °C)	200
Коефіцієнт тепловіддачі сталь повітря	α_{CB}	Дж/(м ² з °C)	10,79
Питома теплота пароутворення	r	Дж/кг	2260000

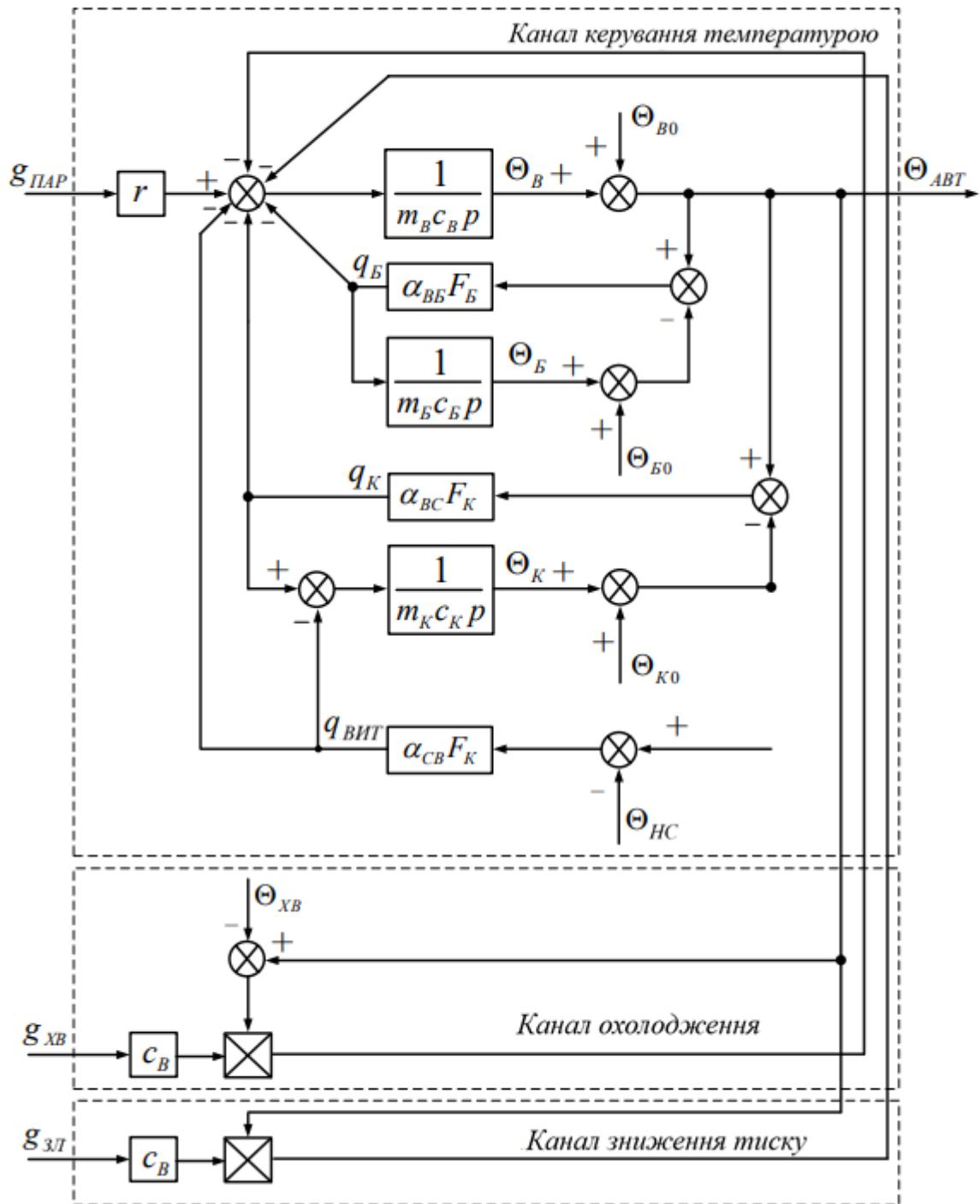


Рисунок 2.4 – Структурна схема каналу регулювання температури автоклавi

2.1.2 Математичний опис процесу зміни тиску в автоклаві

Тиск в автоклаві визначається трьома основними компонентами: парціальним тиском насиченої водяної пари, парціальним тиском повітря та тиском стовпа води. Важливо враховувати, що остання складова, тиск стовпа води, змінюється в залежності від висоти автоклава та місця розташування датчиків.

Однак, через невеликий вплив цієї складової в залежності від висоти та розташування датчиків, її часто можна ігнорувати при розрахунках. Таким чином, формула для розрахунку тиску в автоклаві P_{ABT} , в Па, може бути визначена за допомогою спеціальної формули [25].

$$P_{ABT} = P_{ПАР} + P_{ПОВ} \quad (2.7)$$

$P_{ПАР}$ – тиск насиченої водяної пари, Па;

$P_{ПОВ}$ – парціальний тиск повітря, Па.

Парціальний тиск насиченої водяної пари представляє собою значущу величину, що залежить від температури робочого середовища в автоклаві. Для точного визначення цього тиску можна скористатися таблицею стану насиченої пари на кривій насичення [26], яка враховує залежність парціального тиску від температури.

Ефективним методом визначення значення парціального тиску є використання полінома, отриманого методом найменших квадратів. Цей поліном апроксимує залежність парціального тиску насиченої водяної пари в діапазоні температур від 0 до 130 °С з високою точністю до 197 Па. Форма цього полінома розкривається наступним чином:

$$P_{ПАР} = 0,001\Theta_{ABT}^4 - 0,069\Theta_{ABT}^3 + 5,794\Theta_{ABT}^2 - 24,929\Theta_{ABT} + 757,749 \quad (2.8)$$

Парціальний тиск повітря на підставі закону Менделєєва Клапейрона:

$$P_{\text{ПОВ}} = \frac{m_{\text{ПОВ}} R (\Theta_{\text{АВТ}} + 273)}{V_{\text{ПОВ0}}} \quad (2.9)$$

$m_{\text{ПОВ}}$ – маса повітря в автоклаві, кг;

$V_{\text{ПОВ0}} = 0,25 \text{ м}^3$ – початковий об'єм повітря в автоклаві, м³;

$\Theta_{\text{АВТ}}$ – температура в автоклаві, °С;

$R = 286 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ – постійна газова.

Газова постійна R являє собою фізичну постійну, яка для кожного газу набуває цілком певного значення, що залежить від природи газу і залежить від його стану.

Маса повітря в динаміці:

$$dm_{\text{ПОВ}} = (g_{\text{ПОВ}} - g_{\text{ЗЛ}}) dt \quad (2.10)$$

$g_{\text{ПОВ}}$ – масова витрата повітря через регулюючий клапан, кг/с.

Збільшення парціального тиску повітря, Па:

$$dP_{\text{ПОВ}} = \left(\frac{(g_{\text{ПОВ}} - g_{\text{ЗЛ}})}{V_{\text{ПОВ}}} R (\Theta_{\text{АВТ}} + 273) \right) dt \quad (2.11)$$

Представлені вхідні дані відкривають можливість розширення структурної схеми, що подана на рисунку 2.4. За допомогою цих даних можна врахувати вплив тиску на ключові характеристики досліджуваної системи, який ілюструється на рисунку 2.5.

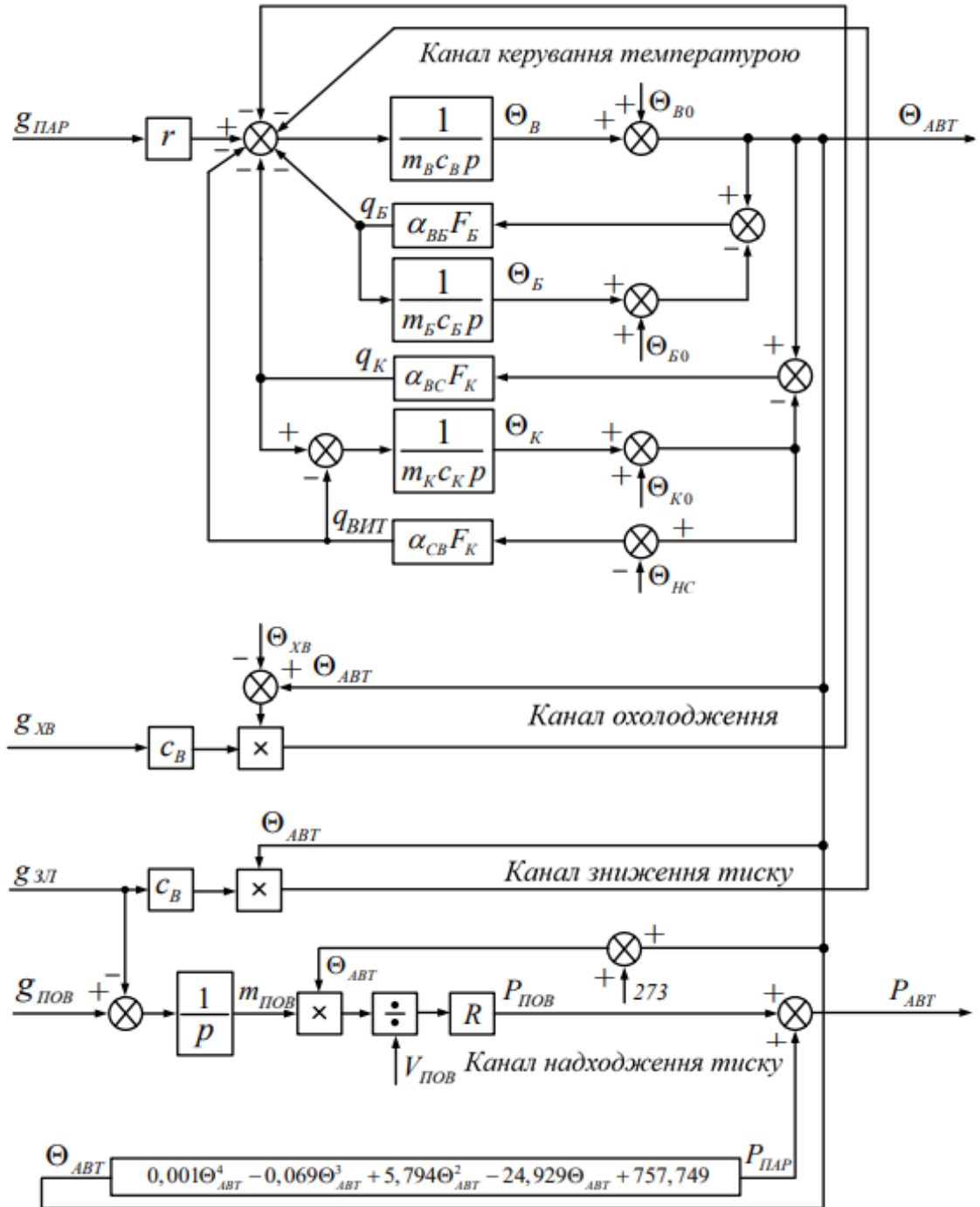


Рисунок 2.5 – Структурна схема регулювання каналу температури та тиску в автоклаві

2.2 Математичне моделювання процесу зміни температури і тиску в автоклаві

Вхідними параметрами для регулювання температури та тиску в структурній схемі (рисунок 2.5) є витрати пари, води, повітря та пароповітряної суміші. Для регулювання масової витрати в трубопроводі встановлюють регулюючий клапан.

Вибір типу регулюючої арматури (регулюючого вентиля, регулюючого клапана тощо) визначається його призначенням. Для безперервного регулювання витрати середовища з метою зміни регульованих параметрів температури та тиску в автоклавах використовують з одним сідлом (або з двома) клапани з пневматичним мембранним виконавчим механізмом (МВМ).

Витрата регульованого середовища змінюється відповідно до сигналу, що надходить від керуючого пристрою. Регулювання витрати відбувається шляхом зміни ступеня відкриття перерізу між поршнем та сідлом всередині клапана [27].

Площа відкритого перетину залежить від положення поршня відносно сідла. Положення поршня визначається положенням рівноваги рухомої системи клапана - МВМ. Рівновага системи створюється в момент рівності сили від тиску повітря на мембрану та зусилля пружини.

Силова характеристика пружини має лінійну залежність від ступеня стиснення (відносного ходу пружини). Переміщення поршня відбувається пропорційно тиску повітря на мембрану, якщо не враховувати вплив незначної нелінійності деяких параметрів пружини та мембрани.

Профіль поршня забезпечує зміну витрати від мінімального до максимального значення. Для автоклавів застосовуються клапани з нормально закритим виконанням. Зміна пропускної здатності відбувається переміщенням рухомої частини регулюючого органа, який називається затвором.

Перетин регулюючого органа формується між сідлом та затвором. Сідло є нерухомою кільцевою частиною регулюючого органа. Електропневматичний позиціонер з електричним входним сигналом управління 4-20 мА встановлюється на пневматичні виконавчі механізми та служить для перетворення керуючого сигналу в зусилля пневматичного механізму.

Крім того, позиціонер на регулюючому клапані зменшує відмінність між керуючим сигналом та регулюючим впливом, вводячи зворотний зв'язок по положенню вихідного елемента виконавчого механізму. Датчик положення надає інформацію про положення вихідного елемента виконавчого механізму, яким є затвор регулюючого органа.

Для автоклавів найефективніші саме пневматичні виконавчі механізми, оскільки вони можуть забезпечувати швидкий перехід з робочого стану в положення безпеки, постійну герметичність та високу чутливість до керуючого сигналу. Регулюючий клапан разом з пневмоприводом та електропневмопозиціонером створюють керуючий контур, підпорядкований пристрою управління всьому технологічному процесу.

Пропускна здатність K_V визначається об'ємною витратою рідини в $\text{м}^3/\text{год}$ з густиною середовища (для води рівною $1000 \text{ кг}/\text{м}^3$), яку пропускає регулюючий орган при перепаді тиску на ньому в $1 \text{ кгс}/\text{см}^2$. Поточне значення пропускної здатності при заданій величині ходу (u відсотках) вказується відповідним індексом.

Пропускна характеристика $K_V = f(z)$ визначає залежність пропускної здатності від переміщення затвора z . В автоклавах зручно використовувати регулюючі клапани (з одним сідлом) з лінійною пропускною характеристикою.

Ця характеристика є найбільш поширеною на виробництві при регулюванні технологічних процесів. Лінійна пропускна характеристика забезпечує збільшення пропускної спроможності пропорційно переміщенню затвора. Робоча витратна характеристика визначає залежність витрати в робочих умовах від переміщення затвора. Так здійснюється контроль на всьому робочому діапазоні регулювання.

Лінійна характеристика використовується при постійному перепаді тиску в умовах зміни навантаження. Лінійна характеристика відповідає однаковим приростам значення пропускної здатності K_V при рівних приростах ходу.

Масова витратна середовища (води, пари, повітря та видалення пароповітряної суміші з автоклава) через пневматичне одне сідло виконавчий пристрій визначається як [28]:

$$g_{KL} = \mu_{KL} S_{KL} \sqrt{2\rho(P_M - P_{AVT})} \quad (2.12)$$

g_{KL} – масова витрата середовища через регулюючий орган, кг/с;

μ_{KL} – коефіцієнт витрати клапана (0,5-0,7) [27];

P_M – тиск у магістралі, Па;

P_{AVT} – тиск в автоклаві, Па;

ρ – густина середовища, кг/м³;

Площа прохідного перерізу
клапана, м²:

$$S_{KL} = \frac{3,14 \cdot \left(d_0^2 - \left(d_0 - \frac{X \cdot d_0}{X_{max}} \right)^2 \right)}{4} \quad (2.13)$$

d_0 – діаметр прохідного перерізу клапана, м;

X_{max} - максимальний перебіг регулюючого органу, %;

X - заданий хід регулюючого органу, %.

Густина різних середовищ [29]:

$\rho_{ПАР} = 2,163$ кг /м³ – густина пари, кг/м³;

$\rho_{ХВ} = 1000$ кг /м³ – густина води, кг/м³;

$\rho_{ПОВ} = 1,2$ кг /м³ – густина повітря, кг/м³

За допомогою формули (2.12), можна розрахувати максимальну масову витрату для всіх вхідних трубопроводів, включаючи трубопроводи пари, води, повітря та трубопровід зливу пароповітряної суміші.

Масова витрата досягає свого максимуму при повному відкритті клапана подачі пари:

$$g_{ПАР} = 0,7 \cdot \frac{3,14 \cdot (0,05)^2}{4} \sqrt{2 \cdot 2,163 \cdot (400000 - 0)} = 1,8 \text{ кг / с.} \quad (2.14)$$

Масова витрата досягає свого максимуму, коли клапан подачі повітря повністю відкритий:

$$g_{ПОВ} = 0,7 \cdot \frac{3,14 \cdot (0,05)^2}{4} \sqrt{2 \cdot 1,2 \cdot (400000 - 0)} = 1,346 \text{ кг / с.} \quad (2.15)$$

Масова витрата при повністю відкритому клапані зливу пароповітряної суміші з автоклаву:

$$g_{ЗЛ} = 0,7 \cdot \frac{3,14 \cdot (0,05)^2}{4} \sqrt{2 \cdot 1,2 \cdot |(0 - 400000)|} = 0,134 \text{ кг / с.} \quad (2.16)$$

На малюнку 2.16 наведено динамічну структурну схему моделі процесу зміни температури та тиску в автоклаві, у якій враховані характеристики регулюючих органів для кожного каналу впливу (пара, вода, повітря та злив). Базовою інформацією для моделей регулюючих клапанів в кожному каналі послужила формула 2.12.

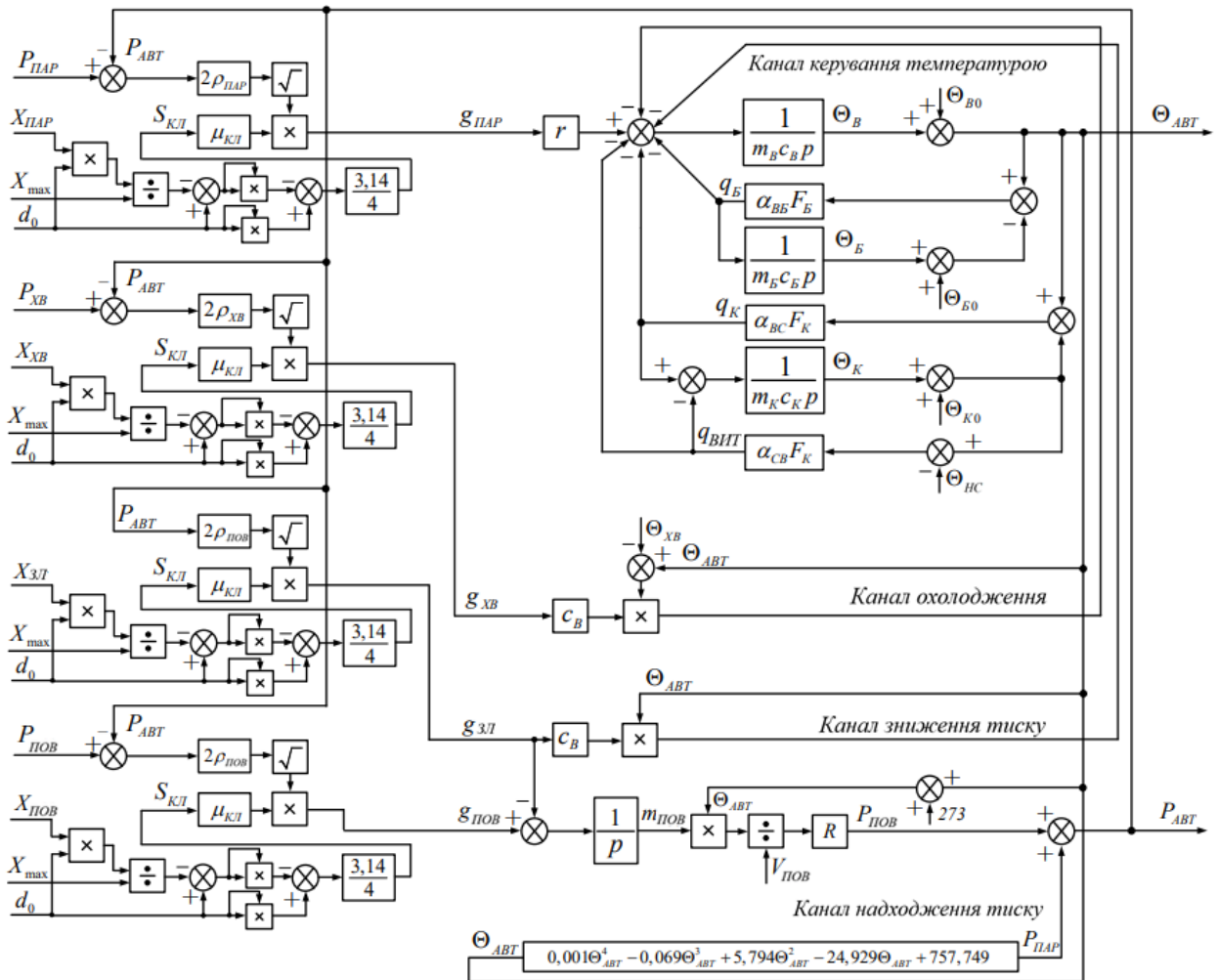


Рисунок 2.6 – Структурна схема моделі автоклава з урахуванням виконавчих механізмів

На Рисунку 2.6 додатково використовуються такі позначення:

$X_{ПАР}$ – сигнал керування клапаном парової магістралі, % ходу регулюючого органу;

$X_{ХВ}$ – сигнал керування клапаном подачі холодної води, % перебігу регулюючого органу;

$X_{ПОВ}$ – сигнал керування клапаном подачі стиснутого повітря, % ходу регулюючого органу;

$X_{ЗЛ}$ – сигнал керування клапаном зливу пароповітряної суміші з автоклаву, % ходу регулюючого органу.

Схема моделювання з включеними у неї числовими значеннями констант представлена у Додатку А.

В сучасному світі одним із потужних інструментів для вивчення, аналізу та проектування складних технологічних процесів є комп'ютерне моделювання. Цей підхід значно підвищує ефективність досліджень, зменшуючи час та матеріальні витрати. Суть комп'ютерного моделювання полягає в заміні вихідного об'єкта математичною моделлю та вивченні цієї моделі за допомогою обчислювальних алгоритмів, реалізованих на комп'ютерах.

Для реалізації моделі каналу регулювання температури та тиску (рисунок 2.6) використовується програмне середовище Matlab із пакетом Simulink. Це математичне середовище, згадане у [30], дозволяє створювати структурні та імітаційні моделі систем автоматичного управління технологічними процесами та об'єктами.

Модель процесу наростання, стабілізації та скидання температури та тиску в автоклаві при подачі пари, води та повітря з магістралі з постійним тиском та зливу пароповітряної суміші реалізована у програмному середовищі Simulink, і має форму, представлену на Додатку Б

Призначення вхідних і вихідних сигналів у моделі каналу регулювання температури та тиску в Simulink описані в таблиці 2.2. Управління в багатьох аспектах визначається точністю прогнозу математичної моделі параметрів технологічного процесу. Особливість математичної моделі процесу стерилізації консервів (Додаток Б) полягає в тому, що вона складається з двох взаємодіючих математичних моделей окремих процесів. Складність математичної моделі вимагає розробки спеціальної методики для її ідентифікації.

Таблиця 2.2 – Вхідні та вихідні параметри в моделі (рисунок 2.7)

Позначення блоку	Опис блоку	Переданий параметр	Розмірність параметра
Step	Генератор ступінчастого сигналу	Відсоток відкриття регулюючого органа (клапана) парової магістралі	%
Step2	Генератор ступінчастого сигналу	Відсоток закриття регулюючого клапана парової магістралі	%
Step3	Генератор ступінчастого сигналу	Відсоток відкриття регулюючого клапана магістралі подачі холодної води	%
Step4	Генератор ступінчастого сигналу	Відсоток закриття регулюючого клапана магістралі подачі холодної води	%
Step5	Генератор ступінчастого сигналу	Відсоток відкриття регулюючого клапана магістралі відведення парово-повітряної суміші з автоклава	%
Step6	Генератор ступінчастого сигналу	Відсоток закриття регулюючого клапана магістралі відведення парово-повітряної суміші з автоклава	%
Step7	Генератор ступінчастого сигналу	Відсоток відкриття регулюючого клапана магістралі подачі стиснутого повітря	%
Step8	Генератор ступінчастого сигналу	Відсоток закриття регулюючого клапана магістралі подачі стиснутого повітря	%
Scope1	Осциллограф	Відображення температури води, банок та корпусу в автоклаві	°C
Scope2	Осциллограф	Відображення температури води та абсолютного тиску в автоклаві	°C , кПа

Для проведення імітаційних досліджень щодо впливу режимних параметрів та умов функціонування на якісні характеристики технологічного процесу стерилізації консервів та для вирішення завдань управління процесом стерилізації при різних завадах необхідна математична модель процесу (рисунок 2.7), яка могла б відображати його хід в усьому діапазоні можливих режимів роботи.

Оскільки схема моделювання каналу регулювання температури та тиску в Simulink (рисунок 2.7) виявилася достатньо громіздкою та не зручною для подальшого використання при синтезі системи регулювання, пропонується об'єднати її в підсистему Simulink.

Підсистема є фрагментом моделі Simulink, оформленим у вигляді окремого блоку. Використання підсистем при створенні моделі має кілька переваг [30]:

- Зменшення кількості одночасно відображуваних блоків на екрані, що полегшує сприйняття моделі.
- Підвищення технологічності завдяки створенню та налагодженню фрагментів окремо.
- Створення користувацьких бібліотек з включенням в модель власних довідкових засобів.
- Можливість синхронізації паралельно працюючих підсистем.

Для створення в моделі елемента у вигляді підсистеми вибирається фрагмент моделі, який об'єднується в підсистему, а входи та виходи елемента забезпечуються відповідними портами. Модель технологічного процесу регулювання температури та тиску в автоклаві, представлена у вигляді підсистеми Simulink, подана на рисунку 2.8. Призначення вхідних і вихідних портів підсистеми описано в таблиці 2.3.

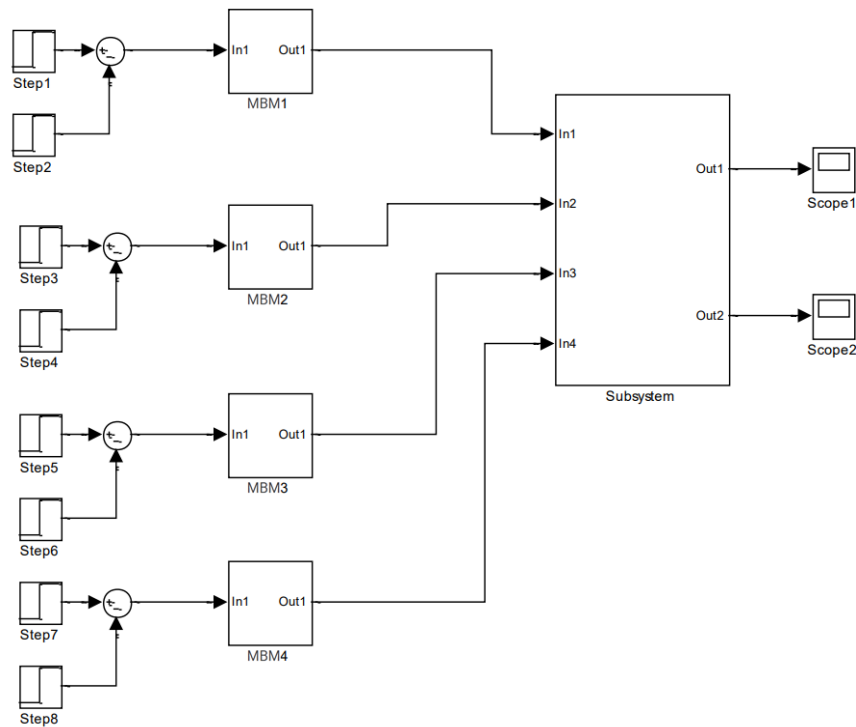


Рисунок 2.8 – Модель технологічного процесу регулювання температури та тиску в автоклаві у вигляді підсистеми Simulink (Subsystem)

Таблиця 2.3 – Вхідні та вихідні параметри в підсистемі Subsystem

Позначення порту	Опис порту	Передаваний параметр	Розмірність параметра
In1	Канал керування температурою	Сигнал управління регулюючим клапаном парової магістралі	%
In2	Канал охолодження	Сигнал управління регулюючим клапаном магістралі подачі холодної води	%
In3	Канал зниження тиску	Сигнал управління регулюючим клапаном магістралі зливу пароповітряної суміші з автоклаву	%
In4	Канал надходження тиску	Сигнал управління регулюючим клапаном магістралі подачі стиснутого повітря	%
Out1	Канал вимірювання температури	Температура води в автоклаві	°C
Out2	Канал вимірювання тиску	Тиск в автоклаві	кПа

Для відображення повної моделі технологічного процесу регулювання температури та тиску в автоклаві з використанням системи автоматичного управління потрібно врахувати динамічні властивості виконавчих механізмів, які у нашому випадку є мембранними виконавчими механізмами (МВМ) з електропневматичними позиціонерами (ЕПП). Ланка, що відображає динамічні властивості виконавчих пристроїв, пропонується також виготовити у вигляді підсистеми (рисунок 2.9) та позначити як МВМ1, МВМ2, МВМ3 та МВМ4

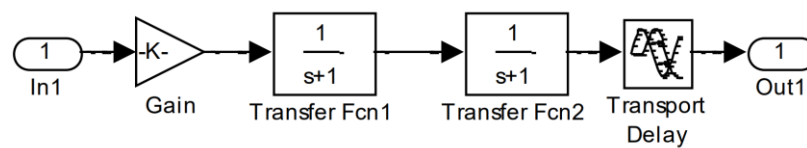


Рисунок 2.9 – Модель мембранного виконавчого механізму як підсистеми Simulink (МВМ)

В нашій моделі виконавчі механізми представлені послідовним з'єднанням двох інерційних ланок із одиничним значенням часу реакції і коефіцієнтом передачі, затримка чистого часу складає 0,1 с. У результаті виконавчий механізм матиме S-подібну динамічну характеристику з зоною невразливості. На динаміку виконавчого механізму суттєвий вплив мають якість змащення у вузлах тертя, величина натягу ущільнювача регулюючого органа і, крім того, динамічні властивості МВМ в процесі його експлуатації можуть досить суттєво змінюватися через стиснення повітря. Реальний час повного ходу вихідного органа виконавчого механізму дорівнює часу, протягом якого вихідний орган виконавчого механізму робить переміщення, рівне значенню повного ходу регулюючого органа.

3. РОЗРОБКА СТРУКТУРИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ СТЕРИЛІЗАЦІЇ КОНСЕРВІВ У ПРОМИСЛОВОМУ АВТОКЛАВІ

3.1 Розробка структури керуючих пристроїв

З точки зору структури системи автоматичного управління (САУ) процесом стерилізації консервів представлений взаємозв'язаною сукупністю об'єкта управління (автоклава) та керуючого пристрою (двоконтурного чотириканального регулятора), вплив якого призводить до досягнення поставленої мети (рисунок 3.1).

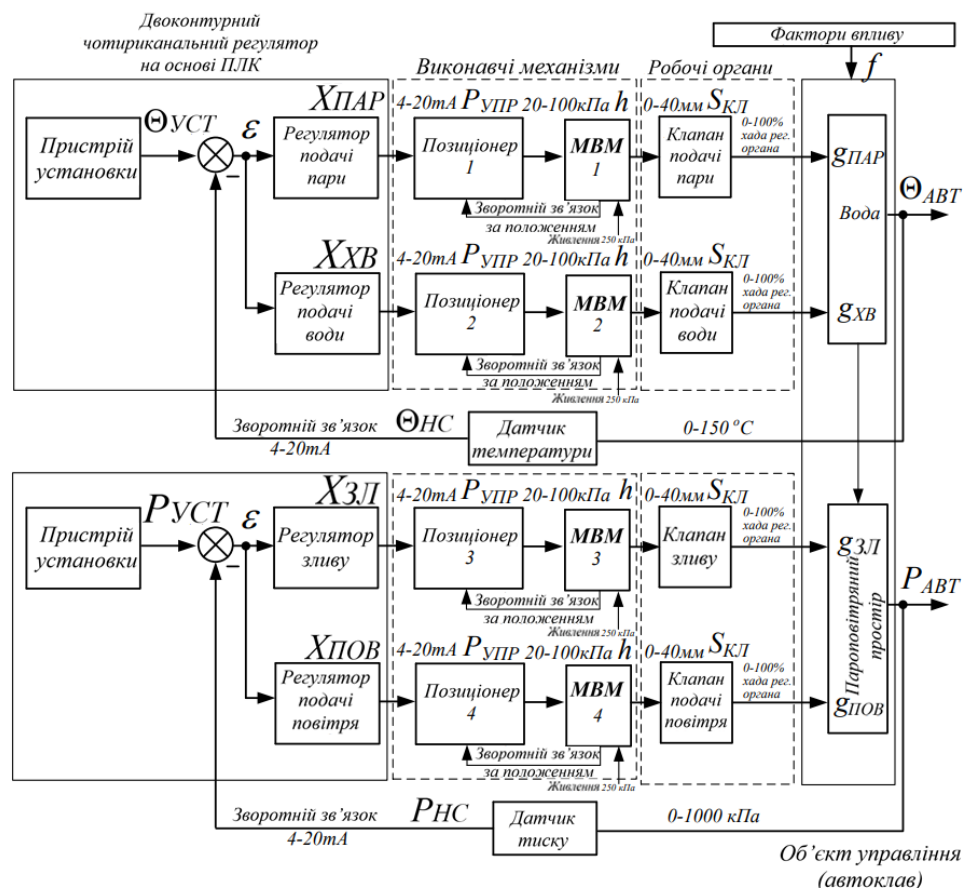


Рисунок 3.1 – Структурна схема системи автоматичного управління технологічним процесом стерилізації консервів у промисловому автоклаві

На рисунку 3.1 автоклав зображений схематично, у вигляді блоку, і не відображає особливостей своєї конструкції. Цікавою є взаємодія між впливом на вході автоклава та його реакцією на виході. Такий підхід дозволяє створити модель, що складається з окремих елементів системи управління, та імітувати їх поведінку, що значно полегшить пошук ефективних методів управління.

У загальному вигляді система (рисунок 3.1) складається з об'єкта управління (автоклава), вимірювальних пристроїв (датчиків), пристрої установки, суматорів, пристроїв управління (регулятора), перетворювальних пристроїв (позиціонерів), мембранних виконавчих механізмів (МВМ) і регулюючих органів (клапанів). Крім того, на об'єкт управління можуть впливати спотворюючі впливи f (зміна тиску в трубопроводах теплоносія, температура теплоносія і т.д.).

Технологічний процес стерилізації консервів в автоклаві характеризується фізичними параметрами, які необхідно змінювати за певним законом. Ці параметри називаються керованими (величина P_{AVT} та Θ_{AVT}).

Пристроєм управління є двоконтурний чотириканальний регулятор на основі ПЛК, який включає в себе комплекс пристроїв, підключених до автоклава та забезпечують автоматичну зміну керованої величини за визначеним законом. Пристрій установки здійснює керуючий вплив (величина $P_{уст}$ та $\Theta_{уст}$) на вхід системи. Вплив виходу системи управління (величина $P_{НС}$ та $\Theta_{НС}$) на її вхід є зворотнім зв'язком. Введення зворотного зв'язку дозволяє керувати автоклавом при зміні його параметрів під час технологічного процесу. Крім того, замкнута система управління з від'ємним зворотнім зв'язком забезпечує досягнення поставлених цілей управління при великій невизначеності спотворюючих впливів та змінах у часі структури і параметрів системи за рахунок зменшення чутливості до цих спотворюючих впливів, варіацій структури та параметрів.

Принцип управління за відхиленням є гнучким, оскільки система отримує інформацію про керуючу величину через зворотний зв'язок і передає її до пристрою керування, який намагається скомпенсувати відхилення яке виникло, таким чином враховується стан об'єкта управління. Така система автоматичного управління (рисунок 3.1) дозволяє отримати високу якість управління, використовуючи одночасно інформацію про вплив і керуючу величину. Вимірювана керуюча величина порівнюється з заданою величиною, і при наявності сигналу розбіжності ε генерується керуючий вплив X , спрямований на компенсацію сигналу розбіжностей [31]. Недоліком принципу є ускладнене розроблення швидкодіючих систем автоматичного управління, особливо для складних інерційних об'єктів управління.

Прагнення збільшити точність роботи системи може призвести до втрати стійкості. Оскільки в розглянутому об'єкті управління можна виділити декілька простих регулюючих ланок, пропонується використовувати цей принцип при розробці системи автоматичного регулювання температури та тиску в автоклаві.

Як показано на рисунках 2.2 і 2.3, структура системи управління автоклавом повинна мати чотири незалежні пристрої управління (регулятори), кожен з яких управляє своєю каналом управління. В автоклаві, як об'єкті управління, задіяно чотири канали: подача пари та холодної води, подача повітря та відведення (спуск тиску).

Структурна схема системи автоматичного управління технологічним процесом стерилізації консервів в промисловому автоклаві показана на рисунку 3.2.

Відмінною особливістю системи автоматичного управління технологічним процесом стерилізації консервів є наявність у неї двох програмованих пристроїв, які формують траєкторію зміни регульованих параметрів: заданої температури води $\Theta_{уст}$ та тиску $P_{уст}$ в автоклаві.

Пристрій установки повинен реалізовувати виконання формули стерилізації консервів (1.1) та таким чином сформувані необхідний графік зміни параметрів технологічного процесу (рисунок 1.2).

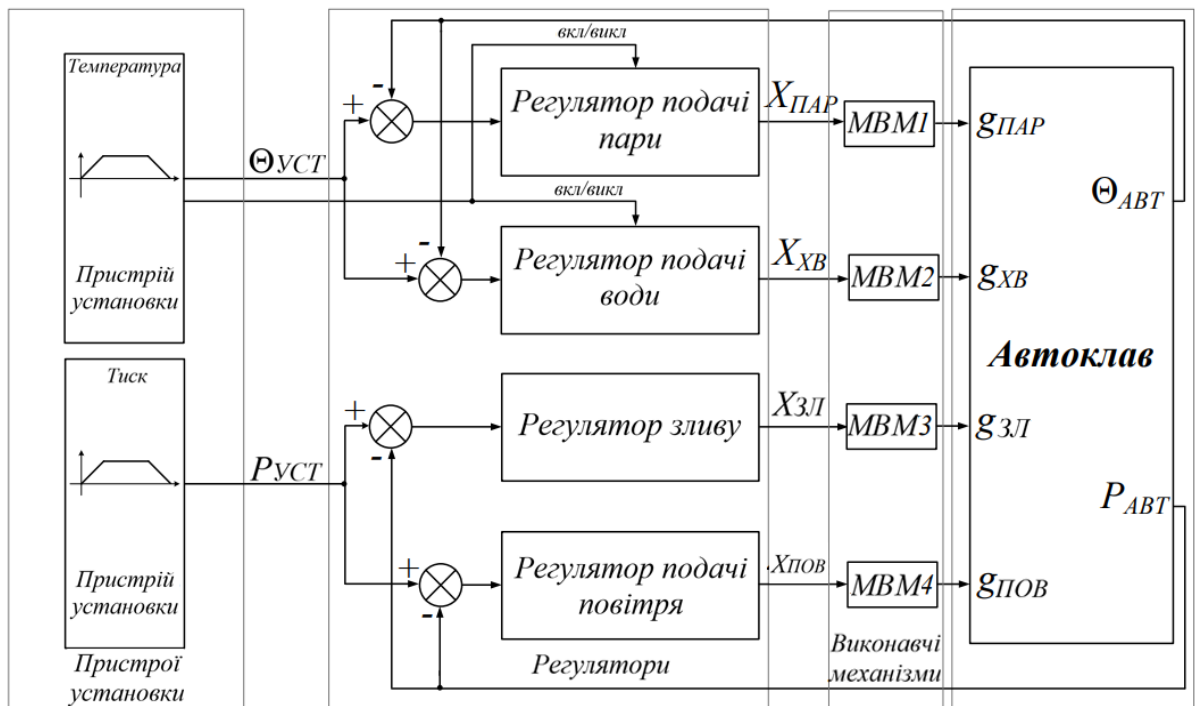


Рисунок 3.2 – Схема моделі системи автоматичного керування технологічним процесом стерилізації консервів

За технологією роботи апаратів для стерилізації, канал подачі пари та холодної води в автоклаві повинен функціонувати у різних (взаємовиключних) інтервалах технологічного циклу. Канал подачі пари працює під час нагрівання теплоносія та стерилізації консервів, а канал подачі води працює під час охолодження продукту. Для цього у програмному пристрої, який задає температуру, передбачений ще один вихідний канал, який сигналізує про завершення періодів нагрівання та стерилізації і переходу до режиму охолодження. Цей сигнал є дозволом для включення в роботу необхідного регулятора в залежності від стадії процесу.

Проведемо аналіз ефективності запропонованої системи управління на прикладі формули стерилізації консерви "Ікра баклажанна" у скляному посуді СКО I-82-500 [32,33]:

$$\frac{A-B-C}{\Theta_{CT}} P_{CT} = \frac{25-50-25}{120} 250 \quad (3.1)$$

Буквенні позначення на графіку стерилізації (рисунок 3.3), відповідно до формули стерилізації консервів "Ікра баклажанна": $A = 25$ - час нагрівання теплоносія в автоклаві від початкової температури до заданої (період нагрівання), хв; $B = 50$ - час витримки при заданій температурі (стерилізація), хв; $C = 25$ - час зниження температури і тиску до рівня, який дозволяє вивантаження (період охолодження), хв; $\Theta_{CT} = 120$ - температура стерилізації, °С; $P_{CT} = 250$ - протитиск, створена в автоклаві для компенсації внутрішнього тиску, що виникає в банці при стерилізації, кПа.

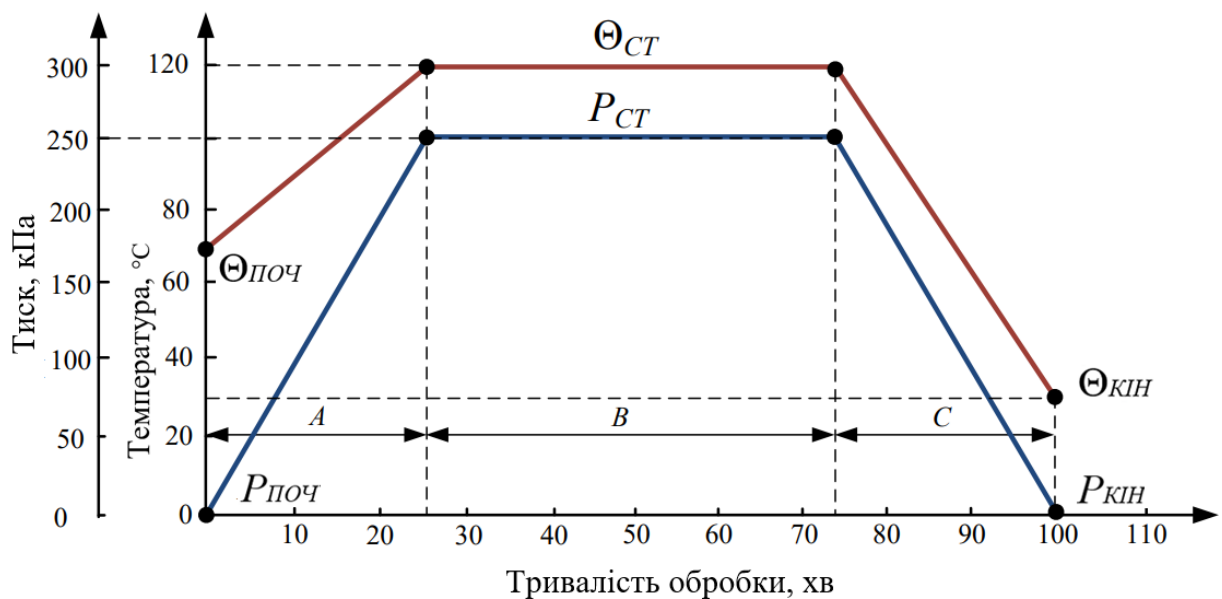


Рисунок 3.3 – Графіки заданого регулювання температури води та тиску в процесі стерилізації

Порядок зміни температури води та тиску в процесі стерилізації наведено на рисунку 3.4

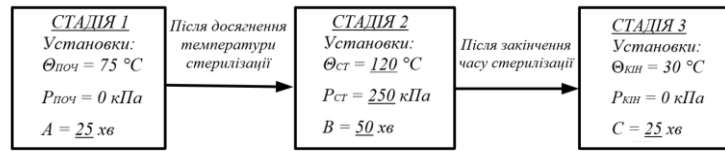


Рисунок 3.4 – Алгоритм зміни температури води та тиску в процесі стерилізації консерви «Ікра баклажанна»

Початкова температура води в автоклаві $\Theta_{поч} = 75 \text{ }^\circ\text{C}$ встановлюється на основі температури завантаженого в банки продукту. Для вирівнювання початкових температур гріючої води і банок останні утримуються протягом певного часу в підігрітій воді. Зазвичай кінцеву температуру води $\Theta_{кін}$ в автоклаві встановлюють на рівні 30-40 $^\circ\text{C}$. Початковий тиск $P_{поч}$ і кінцевий тиск $P_{кін}$ дорівнюють 0 кПа.

Структурні схеми програмного пристрою температури і тиску системи автоматичного управління технологічним процесом стерилізації консервів у промисловому автоклаві у вигляді підсистем Simulink подані на рисунках 3.5 і 3.6. Опис портів підсистем зведено в таблицях 3.1 і 3.2.

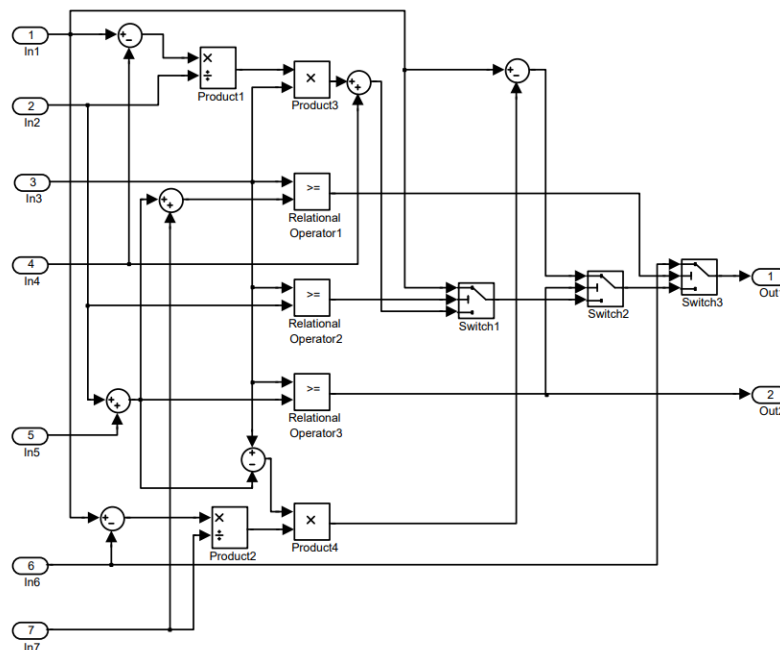


Рисунок 3.5 – Схема програмного пристрою температури у вигляді підсистеми Simulink (Subsystem2)

Параметри температури подано в таблиці 3.1

Таблиця 3.1 – Вхідні та вихідні параметри в підсистемі (рисунок 3.5)

Позначення порту	Позначення параметра	Опис параметра	Розмірність параметра
In1	$\Theta_{ст}$	Температура стерилізації	°C
In2	A	Час нагрівання	с
In3	$Clock$	Поточний час моделювання	с
In4	$\Theta_{поч}$	Початкова температура води	°C
In5	B	Час стерилізації	с
In6	$\Theta_{кин}$	Кінцева температура води	°C
In7	C	Час охолодження	с
Out1	$\Theta_{уст}$	Вказана температура води	°C
Out2	вкл./викл.	Сигнал дозволу	TRUE/FULSE

При створенні моделі підсистеми в Simulink були використані блоки математичних операцій множення та ділення Product, блоки обчислення операцій відношення Relational Operator (зокрема операція більше або дорівнює), а також блоки перемикача Switch [30].

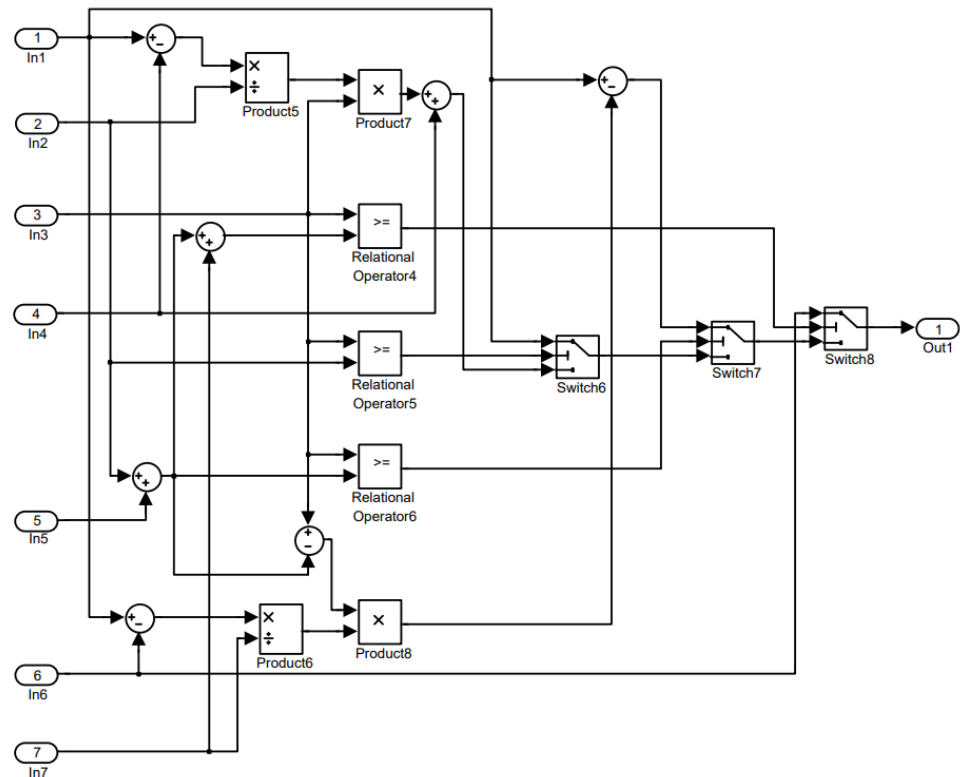


Рисунок 3.6 – Схема програмного пристрою тиску у вигляді підсистеми Simulink (Subsystem3)

Параметри тиску подано в таблиці 3.2

Таблиця 3.2 – Вхідні та вихідні параметри в підсистемі (рисунок 3.6)

Позначення порту	Позначення параметра	Опис параметра	Розмірність параметра
In1	$P_{ст}$	Тиск під час стерилізації	кПа
In2	A	Час надходження тиску	с
In3	$Clock$	Поточний час моделювання	с
In4	$P_{поч}$	Початковий тиск	кПа
In5	B	Час підтримки тиску під час стерилізації	с
In6	$P_{кін}$	Кінцевий тиск	кПа
In7	C	Час зниження тиску	с
Out1	$P_{уст}$	Заданий тиск в автоклаві	кПа

Завданням синтезу системи автоматичного управління (рисунок 3.2) є вибір структури та параметрів системи автоматичного управління, які відповідно до заданих технічних умов забезпечують найбільш раціональні характеристики об'єкта управління за показниками якості регулювання процесу. Якісне управління здійснюється за допомогою введення в кожний канал регулювання спеціальних коригуючих ланок (регуляторів) із спеціально підбраною передавальною функцією за відомими параметрами інших ланок системи.

При реалізації систем автоматичного управління використовується багато різних типів коригуючих пристроїв із різною структурою, але в теорії автоматичного управління особливу увагу приділяють типовим ланкам, які називають регуляторами [34]. Автоматичні регулятори класифікуються за призначенням, конструктивними особливостями, принципом дії, характером зміни регулюючого впливу, видом використовуваної енергії і т.п. За видом виконуваних функцій типові регулятори поділяються на регулятори автоматичної стабілізації, коригуючі, програмні, регулятори співвідношення параметрів та інші. У системі автоматичного управління процесом стерилізації розглядаються два програмні регулятори: регулятор температури та регулятор тиску.

3.2 Оцінка впливу властивостей об'єкта на вибір закону регулювання

Вибір типу регулятора залежить від комплексу показників, які забезпечують формування технологічного процесу з заданою точністю. Досягнення потрібного результату може бути забезпечено як за рахунок застосування простих двопозиційних релейних регуляторів, так і за рахунок більш складних рішень.

Двопозиційні регулятори стали широко використовуваними завдяки своїй простоті та невеликій вартості. Вважається, що можливість дискретного управління процесом стерилізації дозволяє значно спростити апаратну частину системи автоматики. У зв'язку з цим було розглянуто питання розробки регулятора, що здійснює дискретне управління виконавчими механізмами [25].

Слід відзначити, що згідно з вимог технологічного регламенту багато об'єктів не допускають використання релейного керуючого впливу. В результаті експериментальних досліджень на виробництві встановлено, що дискретне управління процесом стерилізації з використанням арматури дискретного принципу дії для регулювання технологічних параметрів не є доцільним і не дозволяє досягти заданої якості регулювання, а також призводить до сильних вібрацій у трубопроводах подачі теплоносіїв. Виявлено, що якість роботи позиційного регулятора в автоклаві не відповідає технологічним вимогам, оскільки система працює в автоколивальному режимі, при цьому амплітуда автоколивань при будь-яких умовах перевищує $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ [35].

На сьогодні практична діяльність, спрямована на автоматизацію виробничих процесів, дозволяє виділити порівняно невелику кількість типових лінійних законів регулювання, які за принципом дії класифікують так.

Пропорційні регулятори [36]. Працюють стійко на багатьох об'єктах регулювання, проте при різних збуреннях (навантаженнях) регульована величина утримується на різних значеннях. Це явище отримало назву

статичної похибки - відхилення регульованої величини від заданого. П-закон управління має найбільшу швидкодію. Однак, якщо коефіцієнт зсуву П-регулятора малий (що часто спостерігається в системах із затримкою), то регулятор не забезпечує задану точність регулювання, оскільки у цьому випадку значна величина статичної похибки. Зазвичай, якщо $K_p \geq 10$, то П-регулятор забезпечує прийнятний результат, при $K_p < 10$ - потрібно введення в закон управління інтегральної складової.

Пропорційно-диференційні регулятори [37]. Ці регулятори мають найвищу швидкодію. ПД-регулятор реагує не лише на величину відхилення, але, що найважливіше, на швидкість її зміни. Недоліками ПД-регулятора є невелика точність і чутливість до шумів.

Пропорційно-інтегральні регулятори [38]. Загалом, ПІ-регулятори, які відрізняються достатньо простою реалізацією, дозволяють стійко і без статичної похибки регулювати роботу промислових об'єктів. ПІ-регулятор має наступні переваги:

1. При правильному налаштуванні похибка регулювання дорівнює нулю.
2. Простота налаштування, що полягає у виборі двох параметрів: коефіцієнта посилення пропорційної складової K_p та коефіцієнта посилення інтегральної складової K_i . При цьому можна знайти оптимальне значення відношення $K_p/K_i \rightarrow \min$, щоб забезпечити керування з мінімальною можливою середньоквадратичною похибкою регулювання.

3. На відміну від ПІД-регулятора має малу чутливість до шумів в каналі вимірювання.

Пропорційно-інтегро-диференційні регулятори [39]. ПІД-регулятор при правильному налаштуванні забезпечує найвищу швидкодію в системі та якісне регулювання технологічного процесу, але вимагає складної процедури налаштування трьох параметрів і уваги при налагодженні та експлуатації. Крім того, через диференціальну складову ПІД-регулятор має підвищену чутливість, а наявність шумів в каналі вимірювання призводить до значних випадкових коливань керуючого сигналу регулятора. Тому ПІД-регулятор слід

обирали для систем регулювання з відносно низьким рівнем шумів та величиною запізнення в об'єкті управління. Якість роботи ПІД-регулятора для систем з великим запізненням порівнюється з якістю роботи ПІ-регулятора, тому ПІД-регулятори знайшли менше поширення в промисловості, ніж ПІ-регулятори.

У зв'язку з багатьма відомими методами розв'язання завдань управління, від примітивних до вкрай складних, вибір базового алгоритму роботи промислового регулятора є нетривіальним завданням. Оскільки загальній критерій оптимальності для вибору регулятора відсутній, автор пропонує розглядати практичний синтез системи автоматичного регулювання (САУ) на кілька етапів, на кожному з яких вирішується якась частина загальної задачі синтезу:

1. Визначення закону регулювання та типу регулятора (коригуючого пристрою) в системі управління відповідно до вимог до її точності, якості управління, надійності, умов роботи щодо зовнішніх впливів і т.д.

2. Отримання математичного опису регулятора для заданого об'єкта управління, а також його коефіцієнтів налаштування.

3. Знаходження найкращого рішення шляхом послідовного розрахунку декількох варіантів керуючого пристрою та його налаштувань, а потім в результаті їх порівняння під час моделювання виявлення оптимального варіанта.

Існують рекомендації щодо попереднього вибору закону регулювання та типу регулятора на основі співвідношення затримки τ до часу постійності T об'єкта регулювання [40].

Якщо $\tau/T < 0,2$, рекомендується вибрати реле, або аналогічний аналоговий чи цифровий регулятор.

Якщо $0,2 < \tau/T < 1$, то рекомендується вибрати аналоговий чи цифровий ПІ-, ПД-, ПІД-регулятор.

Якщо $\tau/T > 1$, тоді вибирають спеціальний цифровий регулятор з упередженням, який компенсує затримку в ланцюгу управління. Такий регулятор також можна використовувати при менших відношеннях τ/T .

У теорії автоматичного управління структура регулятора обирається з урахуванням характеристик об'єкта управління. Складніші регулятори відповідають більш складним об'єктам управління. Завдання розробника полягає у виборі такого типу регулятора, який забезпечуватиме вказану якість регулювання і надійність за мінімальні ресурси.

П-регулятор є досить швидкодіючим, проте наявність статичної помилки є недоліком і вимагає оцінки діапазону відхилень від заданих вимог. Такий регулятор представляє собою ідеальну посилювальну ланку (блок Gain) з коефіцієнтом посилення K_p (рисунок 3.7).

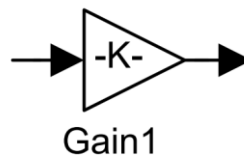


Рисунок 3.7 – Схема П-регулятора у пакеті Simulink

Передатна функція П-регулятора [9]:

$$W_n(p) = K_p \quad (3.2)$$

Вихід пропорційного регулятора визначається добутком помилки неузгодженості $\varepsilon(t)$ на коефіцієнт регулювання K_p :

$$X(t) = K_p \cdot \varepsilon(t) \quad (3.3)$$

Оскільки вивчений об'єкт регулювання не має суттєвого запізнення (рисунок 2.11 і 2.12), то П – регулятор може забезпечити необхідну точність регулювання.

Зазначений вище типовий регулятор є ідеальним, тобто не враховує інерційність його складових. Застосування ідеальних регуляторів у реальних системах автоматичного регулювання можливе, якщо час відгуку використовуваного регулятора досить малий, тобто його можна ігнорувати.

Структурні схеми регуляторів температури і тиску системи автоматичного управління технологічним процесом стерилізації консервів у промисловому автоклаві у формі підсистем Simulink подані на рисунках з 3.8 по 3.11. Для зручності аналізу системи опис портів підсистем зведено в таблицях з 3.3 по 3.6.

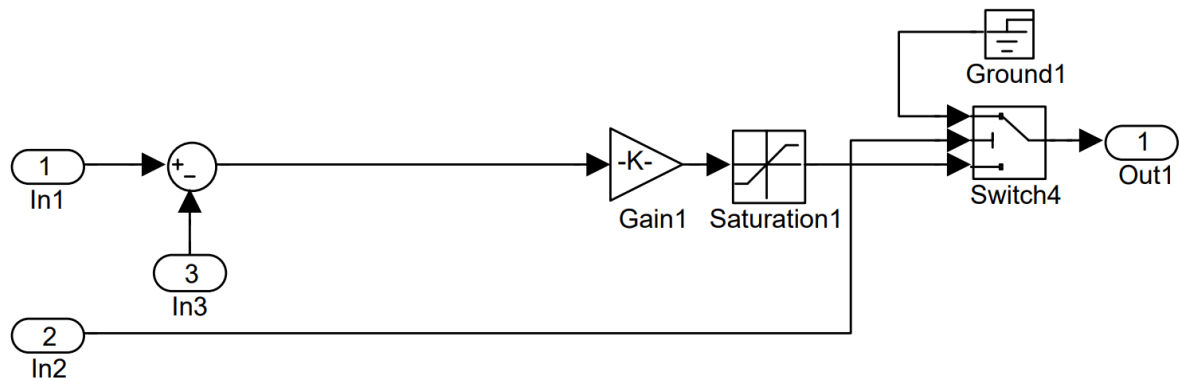


Рисунок 3.8 – Схема регулятора подачі пари у вигляді підсистеми Simulink (Subsystem4)

Параметри подачі пари подано в таблиці 3.3

Таблиця 3.3 – Вхідні та вихідні параметри в підсистемі (рисунок 3.8)

Позначення порту	Позначення параметра	Опис параметра	Розмірність параметра
In1	$\Theta_{уст}$	Задана температура води в автоклаві	$^{\circ}\text{C}$
In2	вкл./викл.	Сигнал дозволу для регулятора	TRUE/FULSE
In3	$\Theta_{авт}$	Виміряна температура води в автоклаві	$^{\circ}\text{C}$
Out1	$X_{ПАР}$	Сигнал управління регулюючим клапаном парової магістралі	%

Схема регулятора подачі води представлена на рисунку 3.9

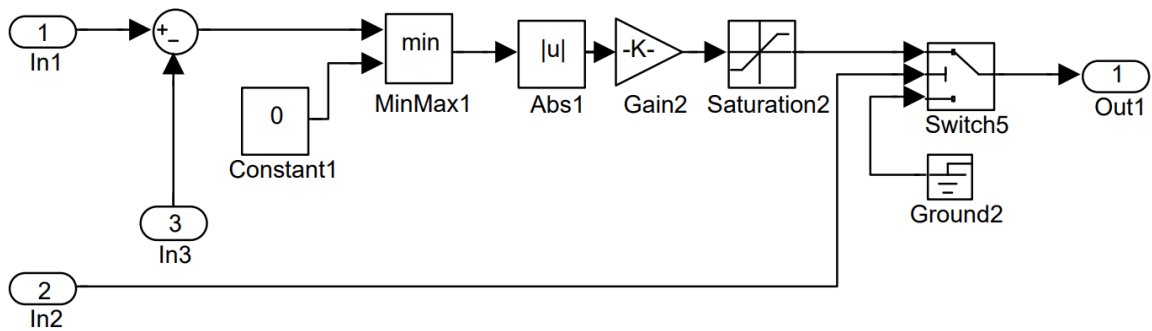


Рисунок 3.9 – Схема регулятора подачі води у вигляді підсистеми Simulink (Subsystem5)

Параметри подачі води подано в таблиці 3.4

Таблиця 3.4 – Вхідні та вихідні параметри в підсистемі (рисунок 3.9)

Позначення порту	Позначення параметра	Опис параметра	Розмірність параметра
In1	$\Theta_{уст}$	Задана температура води в автоклаві	$^{\circ}\text{C}$
In2	вкл./викл.	Сигнал дозволу для регулятора	TRUE/FULSE
In3	$\Theta_{авт}$	Виміряна температура води в автоклаві	$^{\circ}\text{C}$
Out1	X_{XB}	Сигнал управління регулюючим клапаном магістралі подачі холодної води	%

Схема регулятора подачі повітря представлена на рисунку 3.10



Рисунок 3.10 – Схема регулятора подачі повітря у вигляді підсистеми Simulink (Subsystem6)

Параметри подачі повітря подано в таблиці 3.5

Таблиця 3.5 – Вхідні та вихідні параметри в підсистемі (рисунок 3.10)

Позначення порту	Позначення параметра	Опис параметра	Розмірність параметра
In1	$P_{уст}$	Заданий тиск в автоклаві	кПа
In2	$P_{авт}$	Виміряний тиск в автоклаві	кПа
Out1	$X_{пов}$	Сигнал управління регулюючим клапаном магістралі подачі стиснутого повітря	%

Схема регулятора зливу представлена на рисунку 3.11

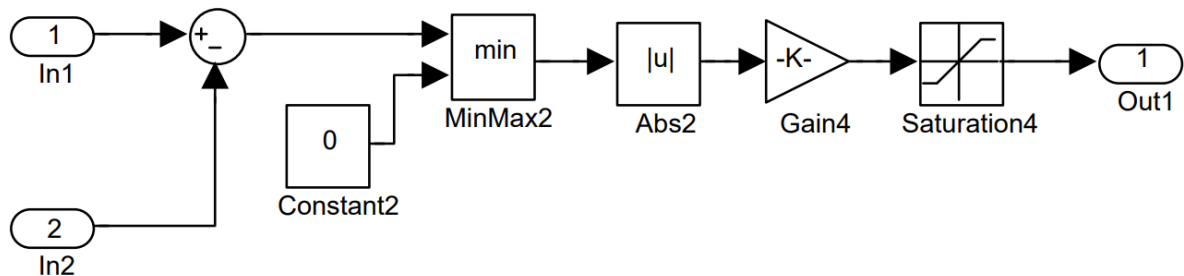


Рисунок 3.11 – Схема регулятора зливу (зниження тиску) у вигляді підсистеми Simulink (Subsystem7)

Таблиця 3.5 – Вхідні та вихідні параметри в підсистемі (рисунок 3.10)

Позначення порту	Позначення параметра	Опис параметра	Розмірність параметра
In1	$P_{уст}$	Заданий тиск в автоклаві	кПа
In2	$P_{авт}$	Виміряний тиск в автоклаві	кПа
Out1	$X_{пов}$	Сигнал управління регулюючим клапаном магістралі зливу пароповітряної суміші із автоклава	%

Для втілення моделей регуляторів у вигляді підсистем в Simulink використовувалися блоки обчислення модуля Abs, визначення мінімального значення MinMax, обмеження Saturation, сигналу нульового рівня Ground і джерела постійного сигналу Constant [30]. Блок підсилювача Gain виступає у ролі задання коефіцієнта підсилення K_p для реалізації П-регулятора.

3.3 Розробка методу розрахунку налаштувань регуляторів

Наступним кроком при розробці системи регулювання є пошук оптимальних параметрів налаштування регулятора. Метою є підбір таких коефіцієнтів регулятора, щоб всі поточні відхилення регульованої величини від заданого значення не перевищували допустимих меж.

Під налаштуванням системи регулювання розуміється перелік розрахункових та експериментальних робіт, спрямованих на пошук налаштовувальних коефіцієнтів регулятора, що забезпечують задану якість регулювання, організацію та проведення натурних випробувань на моделі та реальному об'єкті або розрахункових експериментів для підтвердження оптимальності обраних параметрів. Параметрами налаштування є їхні числові значення для конкретного регулятора, обмеження на діапазони їхньої варіації при пошуку, а також критерії якості [41,42,43].

Налаштування параметрів регулятора залежить від структури системи управління, характеристик її складових частин і поставленої задачі. Крім того, промисловий автоклав може мати індивідуальні налаштування регулятора для кожного етапу технологічного процесу та виду стерилізованого продукту [44]. Для налаштування регуляторів можна використовувати відомі та широко застосовувані методи теорії автоматичного управління. Існує досить багато методів [37,45,39,40], які мають переваги у конкретних застосуваннях: метод Ціглера-Ніколса, метод CHR, метод Куна, метод частотної ідентифікації в замкнутому контурі, оптимальна налаштування регуляторів за номограмами, експериментальний метод налаштування регулятора і ін. Для типових П-, ПІ-, ПІД - регуляторів відомі спрощені аналітичні та табличні методи налаштування, які менш трудомісткі порівняно з експериментальними методами, такими як метод нестихаючих коливань Ціглера-Ніколса, але дають при цьому лише приблизні результати і використовуються на початкових етапах проектування систем управління. Потім отримані коефіцієнти слід

уточнювати за допомогою експериментальних методів на математичній (імітаційній) моделі та реальному об'єкті управління.

При налаштуванні регуляторів, на думку автора, найбільш ефективним є графоаналітичний метод розрахунку параметрів за кривою розгону методом емпіричних формул А.П. Копеловича [46,31]. Метод ґрунтується на апроксимації динамічних процесів, що відбуваються в об'єкті управління, тому для визначення оптимальних значень параметрів регулятора знадобляться знання перехідної функції об'єкта регулювання.

Динамічною характеристикою об'єкта управління називають зміну з часом вихідної величини Y при заданих типових змінах вхідної величини X . В якості типового вхідного впливу зручніше використовувати ступеневе змінення вхідного сигналу ΔX . Тому на практиці найбільш поширеною є крива розгону (рисунок 3.12), тобто динамічна характеристика, що показує зміну в часі вихідної величини об'єкта Y після ступеневого змінення вхідної величини на ΔX . Для статичного об'єкта перехідний процес на кривій розгону завершується досягненням вихідною величиною нового встановленого значення $Y(\infty)$. За допомогою характеристики розгону (рисунок 3.12) визначаються основні параметри об'єкта управління [46]: коефіцієнт передачі K , постійна часу T та величина запізнення τ .

Як вже зазначалося, зручно обробляти характеристику розгону інтерпретаційним графічним методом [41], оскільки йому притаманна простота та достатня точність для розрахунків.

Коефіцієнт передачі об'єкта K [47]:

$$K = \frac{\Delta Y(\infty)}{\Delta X(\infty)} \quad (3.4)$$

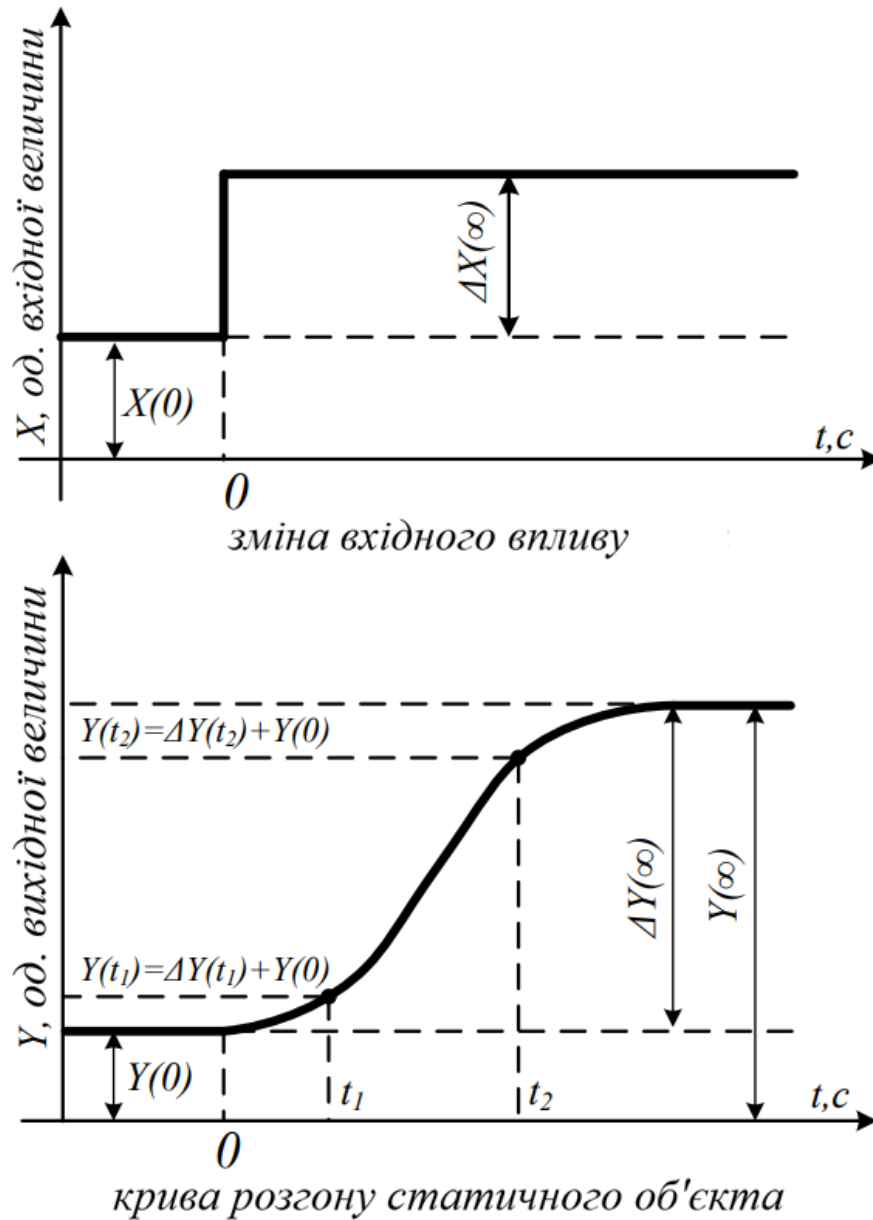


Рисунок 3.12 – Визначення параметрів об'єкта управління за кривими розгону

Постійна часу T та величина запізнення τ об'єкта [31]:

$$T = \frac{t_2 - t_1}{\ln \left(\frac{\Delta Y(\infty) - \Delta Y(t_1)}{\Delta Y(\infty) - \Delta Y(t_2)} \right)} \quad (3.5)$$

$$\tau = T \cdot \ln \left(1 - \frac{\Delta Y(t_1)}{\Delta Y(\infty)} \right) + t_1 = T \cdot \ln \left(1 - \frac{\Delta Y(t_2)}{\Delta Y(\infty)} \right) + t_2 \quad (3.6)$$

Час t_1 та t_2 , що відповідає точкам $Y(t_1)$ та $Y(t_2)$ на кривій розгону (рисунок 3.12), якщо відсутня явна зміна напрямку графіка, слід визначати за точками на графіку, розрахованими за формулами [48]:

$$\Delta Y(t_1) \approx 0,1 \cdot \Delta Y(\infty) \quad (3.7)$$

$$\Delta Y(t_2) \approx 0,8 \cdot \Delta Y(\infty) \quad (3.8)$$

Для обчислення коефіцієнта посилення (K_p) П-регулятора скористаємося емпіричною формулою [46]:

$$K_p = \frac{T}{K \cdot \tau} \quad (3.9)$$

Процедуру розрахунку коефіцієнтів налаштування П-регуляторів за кривими розгону (рисунок 2.11 та 2.12) для чотирьох каналів управління зручніше представити у вигляді таблиць 3.7 та 3.8.

Систему управління можна налаштувати на один із трьох оптимальних регуляційних процесів за допомогою емпіричних формул А.П. Копеловича: аперіодичний із мінімальним часом регулювання, із двадцятьма відсотковим перерегулюванням та із мінімальним середньоквадратичним відхиленням від завдання. Згідно з формулою (3.9) система буде налаштована на перехідний процес, який забезпечить мінімум інтегрального критерію якості, тобто мінімальне середньоквадратичне відхилення від завдання. До переваг налаштування на цей тип процесу можна віднести високу швидкість реакції, проте може виникнути коливання процесу. Оптимізацію цього критерію за параметрами налаштування регулятора можна виконати аналітично, чисельно

або шляхом моделювання. Формули призначені для визначення оптимальних налаштувань типових регуляторів для характерних теплоенергетичних об'єктів, у даному випадку з кривими розгону з самовирівнюванням. Знайдені значення параметрів регулятора приймаються як початкові для подальшої оптимізації на імітаційній моделі за допомогою експериментально-ітеративного методу налагодження [37,46,31], оскільки розрахунок параметрів за формулами не може забезпечити оптимальних налаштувань регулятора.

Для визначення вибору типу регулятора проведено попередню оцінку, використовуючи величину відношення T/τ [49]. З аналізу таблиць 3.7 та 3.8 видно, що у всіх каналах управління відношення T/τ менше 0,2. Отже, для управління прийнятний будь-який із розглянутих регуляторів, включаючи обраний П-регулятор. Це підтверджує його придатність для використання в системі управління, забезпечуючи ефективність та стабільність процесу регулювання температури.

Таблиця 3.7 – Розрахунок коефіцієнтів налаштування П-регуляторів температури по кривій розгону $\Theta_{ABT}(t)$ (рисунок 2.11)

Розрахунковий параметр	Значення	
	Канал подачі пари	Канал подачі холодної води
$\Delta X(\infty)$, %	100	100
$Y(0)$, °C	75	150
$Y(\infty)$, °C	150	20
$\Delta Y(\infty)$, °C	75	130
K	0,75	1,3
$\Delta Y(t_1)$, °C	7,5	13
$\Delta Y(t_2)$, °C	60	104
$Y(t_2)$, °C	82,5	137
$Y(t_1)$, °C	135	46
t_1 , c	11,5	9,9

Продовження таблиці 3.7

t_2, c	125	77,3
T	75,4	44,8
τ	3,5	5,2
τ/T	0,047	0,116
K_p	28,35	6,63

Таблиця 3.8 – Розрахунок коефіцієнтів налаштування П - регуляторів тиску кривої розгону $P_{ABT}(t)$ (рисунок 2.15)

Розрахунковий параметр	Значення	
	Канал подачі стиснутого повітря	Канал зливу (зниження тиску)
$\Delta X(\infty), \%$	100	100
$Y(0), ^\circ C$	34	400
$Y(\infty), ^\circ C$	400	0
$\Delta Y(\infty), ^\circ C$	366	400
K	3,66	4
$\Delta Y(t_1), ^\circ C$	36,6	40
$\Delta Y(t_2), ^\circ C$	292,8	320
$Y(t_2), ^\circ C$	70,6	360
$Y(t_1), ^\circ C$	326,8	80
t_1, c	0,08	0,085
t_2, c	0,867	0,907
T	0,523	0,546
τ	0,025	0,027
τ/T	0,047	0,05
K_p	5,753	5,036

Оскільки схеми моделювання пристроїв установлення та регуляторів температури і тиску в Simulink є досить складними, пропонується відобразити ці пристрої у вигляді підсистем Simulink (див. розділ 2, рисунок 2.9). Модель системи автоматичного управління технологічним процесом стерилізації консервів у промисловому автоклаві у вигляді підсистем Simulink наведено на рисунку 3.13.

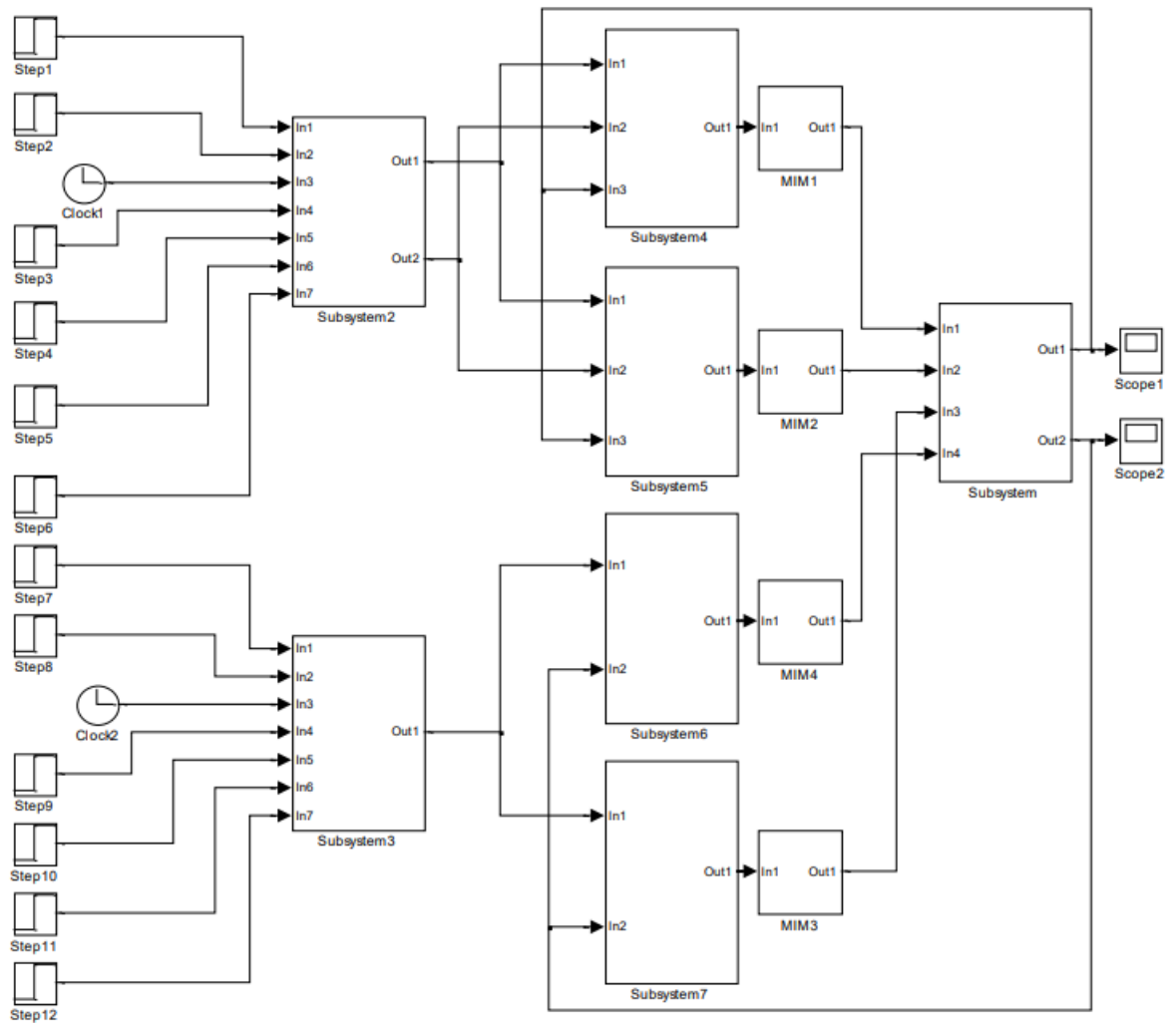


Рисунок 3.13 – Модель автоматизованої системи управління технологічним процесом стерилізації консервів у промисловому автоклаві у вигляді підсистем Simulink

Призначення вхідних та вихідних сигналів моделі подано в таблиці 3.9.

Таблиця 3.9 – Вхідні та вихідні параметри у моделі Simulink (рисунок 3.13)

Позначення блока	Позначення параметра	Опис параметра	Розмірність параметра
Step1	$\Theta_{ст}$	Температура під час стерилізації	°C
Step2	A	Час нагрівання	с
Clock1	Clock	Поточний час моделювання	с
Step3	$\Theta_{поч}$	Початкова температура води	°C
Step4	B	Час стерилізації	с
Step5	$\Theta_{кін}$	Кінцева температура води	°C
Step6	C	Час охолодження	с
Step7	$P_{ст}$	Тиск під час стерилізації	кПа
Step8	A	Час надходження тиску	с
Clock2	Clock	Поточний час моделювання	с
Step9	$P_{поч}$	Початковий тиск	кПа
Step10	B	Час підтримки тиску під час стерилізації	с
Step11	$P_{кін}$	Кінцевий тиск	кПа
Step12	C	Час зниження тиску	с
Scope1	$\Theta_{авт}$	Виміряна температура води в автоклаві	°C
Scope2	$P_{авт}$	Заданий тиск в автоклаві	кПа

Традиційними методами перевірки правильності визначення властивостей систем автоматичного управління під час синтезу є аналітичні методи, що базуються на опосередкованих показниках (інтегральні оцінки, кореневий годограф, частотні характеристики), які дозволяють оцінювати вплив зміни параметрів замкненої системи на її показники якості за передатною функцією замкненої системи або за частотними характеристиками відкритої системи. На сьогодні, завдяки використанню сучасних засобів імітаційного моделювання [50], передусім системи MATLAB та пакета Simulink, набагато простіше отримати прямі показники якості, ніж опосередковані; до того ж прямі показники якості більш точно визначають властивості системи [38].

Запропоновано перевірити функціональність розробленої системи автоматичного управління технологічним процесом стерилізації консервів у промисловому автоклаві за допомогою графіків регулювання температури води та тиску під час стерилізації (рисунок 3.14), отриманих на основі імітаційної моделі у пакеті Simulink (рисунок 3.13).

Як видно з графіків, закон управління П в цілому забезпечує високу швидкодію і добру точність. Однак у режимі охолодження спостерігається неприпустиме відхилення від завдання в роботі регулятора температури, для усунення якого необхідно введення в закон управління інтегральної складової.

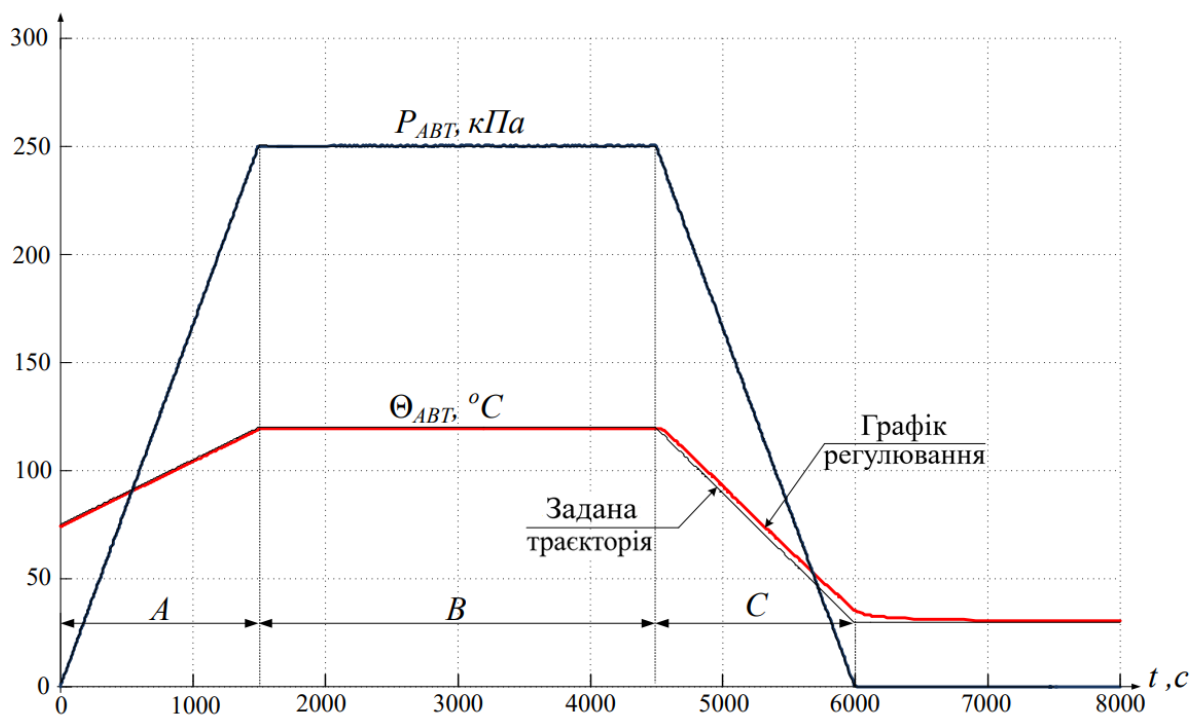


Рисунок 3.14 – Графіки регулювання температури та тиску в процесі стерилізації при використанні П – регуляторів температури та тиску

ВИСНОВКИ

Дослідження, проведені в рамках магістерської роботи, орієнтовані на розробку системи автоматизації технологічного процесу стерилізації консервів у промисловому автоклаві. Отримані результати виявилися дуже значущими для наукового та практичного спрямувань.

1. На основі детального фізичного опису технологічного процесу стерилізації консервів в промисловому автоклаві була успішно розроблена математична модель системи управління у середовищі Simulink. Використання цієї моделі дозволило ефективно розробити систему автоматичного управління та провести її налагодження.

2. Обґрунтовано доцільність використання сучасних методів автоматичного управління для оптимізації параметрів технологічного процесу стерилізації. Запропонований двоконтурний чотирьохканальний регулятор температури та тиску в автоклаві виявився ефективним, сприяючи зниженню обсягу бракованої продукції та забезпеченню економії енергоресурсів.

3. Запропоновану систему управління було успішно реалізовано та протестовано на практиці за допомогою імітаційної моделі у середовищі Simulink. Графіки регулювання температури та тиску підтверджують високу швидкодію та точність системи. Виявлено необхідність введення інтегральної складової для корекції відхилень в режимі охолодження.

4. Обґрунтовано вибір графоаналітичного методу налагодження параметрів регулятора за кривими розгона. Метод базується на апроксимації динамічних процесів у системі, що спрощує налагодження та дозволяє здійснювати оптимізацію системи з урахуванням критеріїв якості.

5. Розроблений регулятор може бути успішно використаний при проектуванні систем управління подібними технологічними установками, а його параметри є вихідними для подальшої оптимізації за допомогою експериментально-ітеративного методу налагодження. Використання

сучасних засобів автоматичного управління відкриває нові перспективи для оптимізації виробничих процесів та підвищення ефективності виробництва.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ястребов С.М., Массовер А.М. Стерилізація консервів. - М.:Харчовийпромвидав, 1961. - 67 с.
2. Трегуб В.Г. Автоматизація періодичних процесів у харчовій промисловості. - Київ: Техніка, 1982. - 160 с.
3. Мокрушин С.А., Хорошавін В.С. Автоматизація процесу стерилізації консервів // «Суспільство-наука-інновації» Зб. матеріалів щор., 2010 р, с.125-127.
4. Назаров Н.І., Гізбург А.С., Гребенюк С.М. та ін. Загальна технологія харчових виробництв. - М.: Легка та харчова промисловість, 1981. - 360 с.
5. Barbosa-Cánovas G. V., Juliano P. Food sterilization by combining high pressure and thermal energy //Food engineering: Integrated approaches. – Springer, New York, NY, 2008. – С. 9-46.
6. Амінов М.С. Апарати для стерилізації консервів. - М.:Харчова промисловість, 1966. - 120 с.
7. Farid M., Ghani A. G. A. A new computational technique for the estimation of sterilization time in canned food //Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. – 2004. – Т. 43. – №. 4. – С. 523-531.
8. Амінов М.С., Амінова Е.М., Горун Є.Г. Виробництво консервів. -М.: Агропромвидав, 1987. - 304 с.
9. Гусаковський З.П., Очкін В.А. Технологія та обладнання м'ясоконсервне виробництво. - М.: Харчова промисловість, 1970. - 400 с.
10. Сучасні технології процесу стерилізації консервів як об'єкти управління / С. А. Мокрушин, В. С. Хорошавін, 2012 "Оптимізація управління електромеханічних систем". Стаття №7).
11. Зонін В.Г. Сучасні технології м'ясних консервних продуктів.- СПб.: Професія, 2008. - 224 с.

12. Miri T. et al. Global optimization of process conditions in batch thermal sterilization of food //Journal of food engineering. – 2008. – Т. 87. – №. 4. – С. 485-494.
13. Кошова С. Є. Математичне моделювання процесу теплової стерилізації та технологічного комплексу обладнання для консервних виробництв малої потужності: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12 /Кошова Софія Євгенівна, 1996. - 24 с.
14. Gonçalves E. C. et al. Modeling sterilization process of canned foods using artificial neural networks //Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. – 2005. – Т. 44. – №. 12. – С. 1269-1276.
15. Llave Y. A., Hagiwara T., Sakiyama T. Artificial neural network model for prediction of cold spot temperature in retort sterilization of starch-based foods //Journal of Food Engineering. – 2012. – Т. 109. – №. 3. – С. 553-560.
16. Білоусов Л.П., Осипов А.М. Технологія консервування та технологічний контроль. - М.: Економіка, 1965. - 432 с.
17. Щокін Б.Є. Розробка та дослідження системи автоматичного управління для стерилізації консервів: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06, 1975. - 166 с.
18. Асмаєв М.П., Корнілов Ю.Г. Моделювання процесів харчових виробництв. - М.: Легка та харчова промисловість, 1982. - 176 с.
19. Корнілов Ю.Г., Асмаєв М.П. Теплообмінні установки харчової промисловості як об'єкти керування, 1977. - 92 с.
20. Модель технологічного процесу стерилізації консервів у промисловому автоклаві С.А. Мокрушин //Наук. вид-во ВятГУ, 2017.
21. Маслов А.М. Устаткування для високотемпературної пастеризації, стерилізації та охолодження харчових рідин, 1967. - 232 с.
22. Ghani A. G. A. et al. Thermal sterilization of canned food in a 3-D pouch using computational fluid dynamics //Journal of Food Engineering. – 2001. – Т. 48. – №. 2. – С. 147-156.

23. Hiddink J. Natural convection heating of liquids, with reference to sterilization of canned food. – Centre for Agricultural Publishing and Documentation

Pudoc, 1975.

24. Бункін П.Я. Типові регулятори систем керування П.Я. Бункін, 2013. - 25 с.

25. Вискубов Є. В. Розробка мікропроцесорних систем управління періодичними процесами теплової обробки харчових продуктів (на прикладі САУ стерилізації консервів): дис. ... канд. техн. наук: 05.13.07 /Вискубов Євген Володимирович, 1996. - 162 с.

26. Рівкін С.Л., Александров А.А. Термодинамічні властивості води та водяної пари: Довідник. - М.: Вища школа, 1984. - 80 с.

27. Гуревич Д.Ф. Конструювання та розрахунок трубопровідної арматури: Машинобудування, 1968 - 888 с.

28. Жежера Н.І. Автоматизація випробувань виробів на герметичність: навчальний посібник/Н.І. Жежера : ГОУ ОГУ, 2005. - 475 с.

29. Лукин О.Г. та ін. Курсове та дипломне проектування технологічного обладнання харчових виробництв. – М.: Агропромвидав, 1990. – 269 с.

30. Чорних І.В. SIMULINK: середовище створення інженерних програм/ за заг. ред. к.т.н. В.Г.Потьомкіна. - М.: ДІАЛОГ-МІФІ, 2003. - 496 с.

31. Мартиненко І.І., Лисенков В.Ф. Проектування систем автоматики. - 2-ге вид., перероб. та дод. - М.: Агропромвидав, 1990. - 243с.

32. Амінов М.С. Теоретичне та експериментальне обґрунтування безперервної стерилізації консервів у потоці гарячого повітря: автореф. дис.... д-ра техн. наук: №175 - Ленінград, 1969. - 21 с.

33. Бабарін В.П. Стерилізація консервів: довідник - СПб.:ГІОРД, 2006. - 312 с.

34. Дикий Б.Ф., Фан-Юнг А.Ф. Автоматизація консервного виробництва. - М.: Харчова промисловість, 1966. - 341 с.

35. Мокрушин С.А. / Проблеми реалізації системи регулювання процесу стерилізації консервів / С. А. Мокрушин, В.С. Хорошавін // В'ят. держ. ун-т; відп. ред. С.Г. Литвінець, 2011.(Факультет автоматики та обчислювальної техніки. Секція «Оптимізація управління електромеханічними системами». Стаття №8).

36. Ключніков В. В. Проектування систем управління технологічними процесами та апаратами харчових виробництв (завдання та вправи): навчальний посібник/В. В. Ключніков, 2010. - 161 с.

37. Андрюшин А.В. Управління та інноватика у теплоенергетиці: навчальний посібник/А.В. Андрюшин, В.Р. Сабанін, Н.І. Смирнов. - М.:Видавничий дім МЕІ, 2011 – 392 с.

38. Щербаков В.С., Руппель А.А., Глушець В.А. Основи моделювання систем автоматичного регулювання та електротехнічних систем у середовищі Matlab та Simulink: Навчальний посібник. Вид-во Сібаді, 2003. - 160 с.

39. Войтенко В.П. Квазіоптимальні промислові регулятори з нейроідентифікацією об'єкта управління. - Чернігів: Чернігівський держ.технол. ун-т, 2013. - 337 с.

40. Магергут В.З., Вент Д.П., Кацер І.А. Інженерні методи вибору та розрахунок оптимальних налаштувань промислових регуляторів, 1994. - 158 с.

41. Мокрушин С.А. Інженерні методи ідентифікації статичних об'єктів управління з метою їхньої подальшої автоматизації/С.А. Мокрушин, А.В. Журавльов, С.В. Кротов, В.П. Теплих // Наука та освіта у ХХІ столітті: Збірник наукових праць за матеріалами Міжнародної науково-практичної конференції 30 грудня 2013 р. , 2014 р.- с. 55-57.

42. Охалкін С.І. До питання про методи ідентифікації теплоенергетичних об'єктів управління/С.І. Охалкін, С.А. Мокрушин, С.Г. Афанасьєв// Науковий журнал "Advanced science", 2014 р. – №1(4). - С. 10-23.

43. Порівняльний аналіз методів ідентифікації об'єкта управління / С. А. Мокрушин [та ін] /В'ят. держ. ун-т; відп. ред. С. Г. Литвінець, 2013 (Факультет

автоматики та обчислювальної техніки. Секція «Оптимізація управління електромеханічних систем», ст. 22).

44. Мокрушин С.А., Хорошавін В.С., Наглядів Н.І. Дослідження автоматичного налаштування ПІД-регулятора // «Суспільство-наука-інновації» Зб. матеріалів щор., 2010 р, с.116-119.

45. Бурцева Ю. С. Безпошуковий метод розрахунку налаштувань регуляторів на мінімум квадратичного критерію: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 /Бурцева Юлія Сергіївна, 2014. - 156 с.

46. Глінков Г.М., Маковський В.А., Лотман С.Л., Шапіровський М.Р. Проектування систем контролю та автоматичного регулювання металургійних процесів. - М.: Металургія, 1986. - 352 с.

47. Комісарчик В.Ф. Автоматичне регулювання технологічних процесів: навчальний посібник/В. Ф. Комісарчик, 2001 – 247 с.

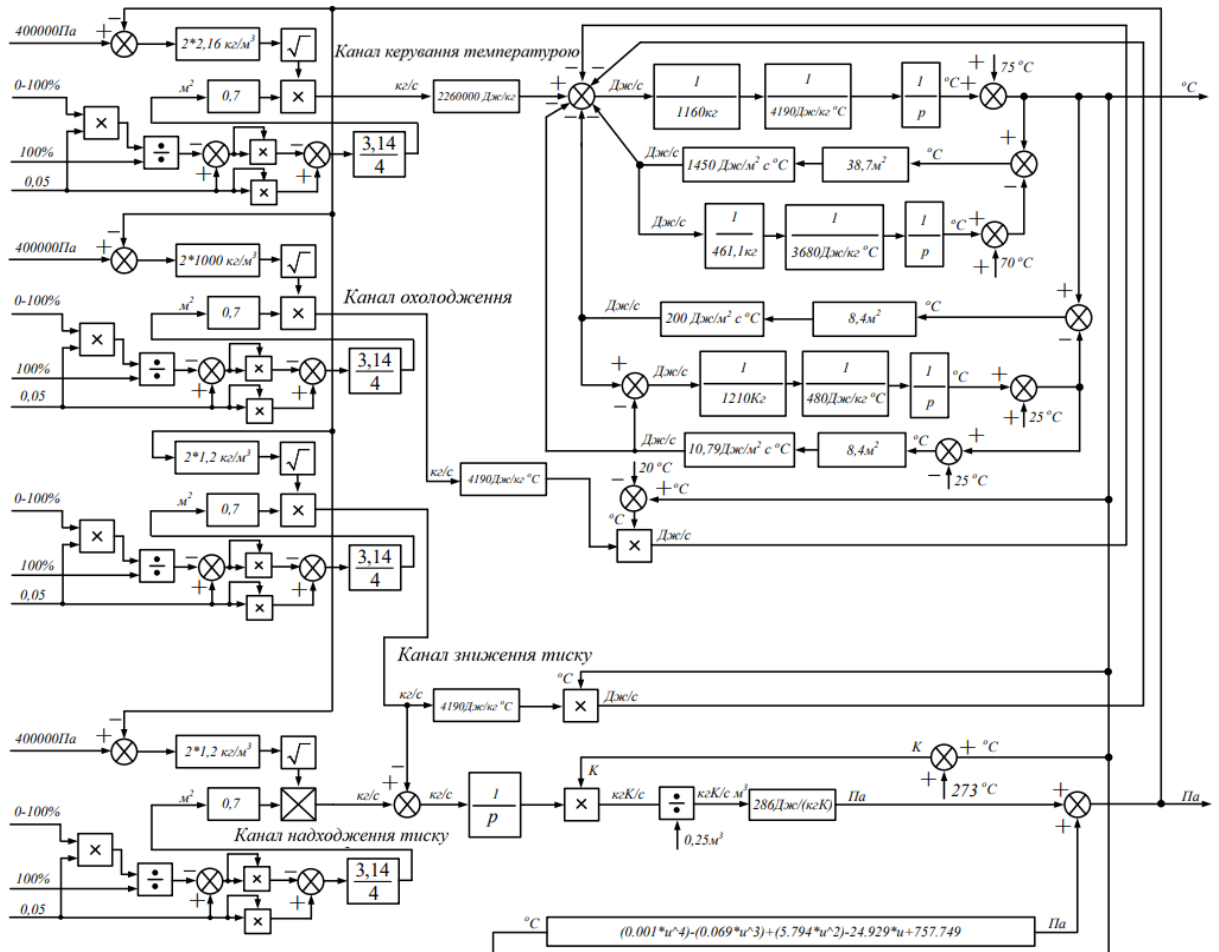
48. Методика ідентифікації об'єкта управління з його подальшої автоматизації / А. В. Коваль. – Житомир : ЖДТУ, 2018. – 133 с. 42.

49. Симоновський А.Ю. Типи регуляторів: Методика налаштування регуляторів/А.Ю. Симанівський – Івано-Франківськ: МІКРОЛ, 2011 – 63 с.

50. Модель системи керування тепловими процесами / С. А. Мокрушин, С. І. Охупкін, С.Г .Афанасьєв//2013.(Факультет автоматики та обчислювальної техніки. Секція «Оптимізація управління електромеханічними системами», ст. 19).

ДОДАТОК А

Схеми моделювання з підставленими числовими значеннями



ДОДАТОК Б

Схема моделювання каналу регулювання температури та тиску в Simulink

