

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

МАРКІНА ЛЮДМИЛА МИКОЛАЇВНА



УДК 681.5

**АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ПРИГОТУВАННЯ ЗАМІСУ ІЗ
ЗЕРНОВОЇ СИРОВИНИ ТА ЙОГО ВОДНО-ТЕПЛОВОЇ ОБРОБКИ У
СПИРТОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ**

05.13.07 – Автоматизація процесів керування

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2025

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Луцького національного технічного університету міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Пальчевський Богдан Олексійович,
професор кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій,
Луцький національний технічний університет

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Максимов Максим Віталійович,
завідувач кафедри програмних і комп'ютерно-інтегрованих технологій,
Національний університет «Одеська політехніка»

кандидат технічних наук, доцент
Борин Василь Степанович,
доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій,
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Захист дисертації відбудеться «18» вересня 2025р. о 15.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.04 у національному університеті "Львівська політехніка" за адресою: 79013, м. Львів. вул. Степана Бандери, 12, ауд. 226, головного навчального корпусу.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці національного університету "Львівська політехніка" за адресою 79013, м. Львів. вул. Професорська, 1. Автореферат розісланий «15» серпня 2025 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 35.052.04
доктор технічних наук, професор



О. М. Химко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність і обґрунтування вибору теми дослідження. Спиртова промисловість є однією з провідних галузей харчової промисловості України і відіграє ключову роль у забезпеченні сировиною таких секторів, як фармацевтичний, харчовий, агропромисловий та паливно-енергетичний комплекси. Технологічний процес виробництва етилового спирту із зернової сировини передбачає складні біохімічні перетворення, зокрема ферментативний гідроліз крохмалю та подальше зброджування цукрів.

Однією з важливих ділянок цього процесу є стадії приготування замісу та його водно-теплова обробка, які спрямовані на забезпечення рівномірного переведення крохмалю в розчинений стан за допомогою теплової обробки. Від ефективності проходження даного етапу залежать стабільність подальших етапів виробництва спирту.

Однак процес приготування замісу супроводжується структурними змінами водно-зернової суміші, які спричинені мікробіологічними та термохімічними змінами і тому спостерігається нестабільність процесу, що ускладнює точне дотримання параметрів відповідно до технологічного регламенту. Відсутність ефективного автоматизованого контролю за показником якості замісу в переважній більшості призводить до порушення технологічних режимів, що в свою чергу негативно відображається на якості етилового спирту та значному перевищенні витрат енергоресурсів.

В переважній більшості показником якості замісу є концентрація розчиненої сухої речовини. Однак даний показник є незручним для вимірювання, вимагає більшого часу для визначення та є непридатним для систем автоматичного керування. Тому виникла проблема, яка призвела до пошуку такого технологічного параметра, який би був придатний для автоматизованої системи керування процесом приготування замісу.

Відповідно до проведеного аналізу та дослідження процесу приготування замісу та водно-теплової обробки було визначено, що такими показниками є густина або в'язкість, які пов'язані з концентрацією розчиненого крохмалю під час термічної обробки.

Використання одного з цих параметрів для контролю концентрації розчиненого крохмалю в замісі дозволяє розробити ефективну систему автоматичного керування. Тому задачі дослідження та розроблення нових алгоритмів для системи керування концентрацією розчиненого крохмалю в замісі є актуальними, а їх вирішення дозволяє покращити динаміку зміни параметрів, зменшити витрати вхідних матеріалів та забезпечить стабільність наступних етапів виробництва.

Зв'язок з науковими програмами, планами і темами. Отримані в дисертаційній роботі наукові результати були використані в науково-дослідній роботі кафедри «Автоматизації та комп'ютерно-інтегровані технології» Луцького національного технічного університету «Дослідження термоферментативної обробки зернової сировини на базі нечіткої логіки» (№16/03-2014), «Розробка, оптимізація та моделювання систем керування виробничими процесами на базі комп'ютерно-інтегрованих технологій» (№ д/р 0116U001950) 2016-2020, в рамках проекту ПЛ-НТУ Транскордонний обмін досвідом в рамках Програми Транскордонного Співробітництва Польща-Білорусь-Україна 2007-2013 та по співдружності з Луцьким спиртогорілчанним заводом.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності виготовлення етилового спирту із зернової суміші шляхом забезпечення стабільності параметрів на стадії приготування замісу та його водно-теплової обробки.

Для досягнення поставленої мети були поставлені такі завдання:

1. На основі проведеного аналізу літературних джерел сформулювати вимоги до системи автоматизації процесу виробництва спирту на стадії підготовки замісу із зернової сировини.
2. Провести аналіз існуючих систем керування та ідентифікувати інформативні технологічні параметри для синтезу системи керування процесом підготовки замісу.
3. Провести порівняння ефективності застосування класичних методів теорії автоматичного керування у взаємозв'язаній системі керування процесом приготування замісу.
4. Синтезувати керуючий вплив в двопараметричній взаємопов'язаній системі, що забезпечить необхідну якість керування процесом приготування замісу.

Об'єкт дослідження – процес приготування замісу та водно-теплової обробки зернової суміші при виробництві спирту.

Предмет дослідження – система автоматичного керування процесом приготування замісу.

Методи дослідження базуються на положеннях методології теорії автоматичного керування. В дисертаційній роботі застосовувались методи системного аналізу, математичного та імітаційного моделювання в програмному середовищі Matlab/Simulink (для розробки структури системи керування приготуванням замісу і його водно-теплової обробки та алгоритмів її функціонування). Вірогідність основних теоретичних положень і результатів перевірялась з використанням математичного моделювання і експериментів у виробничих умовах та впровадженням наукових розробок у виробництво.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Отримала подальший розвиток теорія автоматизації технологічного процесу виготовлення етилового спирту шляхом використання отриманих залежностей між концентрацією сухих речовин, густиною та в'язкістю замісу, що дало змогу створити ефективні системи автоматичного керування процесом приготування замісу і його водно-теплової обробки.
2. Отримали подальший розвиток підходи до моделювання процесу приготування замісу та його водно-теплової обробки, зокрема створено узагальнену модель змішування як об'єкту керування, що забезпечило можливість синтезу керуючих впливів і кількісної оцінки інформативних параметрів: концентрації розчиненого крохмалю та об'єму замісу.
3. Вперше розроблено систему автоматичного керування взаємозв'язаним процесом приготування замісу і його водно-теплової обробки, що дало можливість підвищити ефективність технологічного процесу та якість суслу.
4. Синтезовано LQR-регулятор для автоматизованої системи керування процесом приготування замісу та його водно-теплової обробки, що забезпечило покращення показників якості системи та підвищило швидкодію регулювання об'єму і концентрації розчиненого крохмалю в замісі.

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

1. Проведений порівняльний аналіз функціональних схем автоматизації процесу приготування замісу та розроблено і реалізовано алгоритми, що дали змогу об'єднати всі стадії приготування замісу та його водно-теплової обробки в єдину автоматизовану систему.

2. Використання потужності мішалки як непрямого давача в'язкості забезпечило можливість ефективного контролю показника, який є критично важливим для стабільності процесу приготування замісу.

3. Експериментально підтверджено доцільність урахування температури та в'язкості в системі регулювання процесу приготування замісу та водно-теплової обробки.

4. Досліджено системи керування з застосуванням ПД-регулятора і LQR-регулятора, що дозволило обрати закон регулювання який забезпечує точність регулювання та підвищує якість керування у динамічних режимах.

5. Застосування розроблених рішень у виробничих умовах (зокрема на Луцькому, Марилівському та Борокському спиртових заводах) підтвердило зниження витрат зерна, ферментів і енергії, а також підвищення загальної ефективності процесу до 5% за рахунок стабілізації параметрів замісу та оптимізації водно-теплової обробки.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційне дослідження проведено дисертантом самостійно. Основні теоретичні положення та розробки, що характеризують наукову новизну дослідження, теоретичне і практичне значення його результатів, одержані дисертантом особисто.

Всі ідеї, експериментально-теоретичні дослідження та результати, які викладені в дисертації, автором отримано самостійно. У наукових працях у співавторстві здобувачем особисто виконано та запропоновано: [7, 9] – моделювання процесів змішування та водно-теплової обробки з використанням елементів нечіткої логіки в виробництві спирту; [5, 6, 11, 21] – математичне та імітаційне моделювання системи керування концентрацією крохмалю початкового етапу приготування замісу та його водно-теплової обробки; [8] – дослідження процесу приготування замісу та його водно-теплової обробки та моделювання стану в'язкості замісу у спиртовому виробництві із застосування мультиагентного програмування; [13, 15] – розрахунок та налаштування параметрів LQR-регулятора для системи автоматичного керування процесом приготування замісу та його водно-тепловою обробкою; [12, 18] – розгляд та використання PID-регулятора для системи керування процесом приготування замісу; [10, 16, 19, 20] – аналіз існуючих автоматизованих систем управління та розробка моделей регулювання концентрації замісу; [22, 23] – розробка триконтурних систем керування підготовки замісу; [2, 4, 17] – розгляд основних принципів автоматичного керування процесом підготовки замісу та розробка інтелектуальної схеми взаємодії етапів приготування замісу; [1, 3] – вибір і обґрунтування показника якості початкового етапу підготовки зернового замісу та його водно-теплової обробки; [19] – дослідження процесу приготування замісу в виробництві спирту; [14] – використання комп'ютерних технологій для дослідження систем автоматичного регулювання.

Апробація результатів дисертації. Результати, отримані в дисертаційній роботі, були апробовані та позитивно оцінені на ряді науково-технічних конференцій, а саме: XII Міжнародна науково-практична інтернет-конференція «Актуальні проблеми автоматизації та управління», м. Луцьк, 30 листопада 2024 р.; VIII Міжнародна науково-технічна конференція з проблем вищої освіти і науки ТК-2024, Луцьк, 28-30 травня 2024 р.; VIII Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивні напрямки розвитку автоматизованих технологічних комплексів» ТК-2024, Луцьк, 28-30 травня 2024 р.; 14-та Міжнародна конференція IEEE DESSERT, Афіни, Греція, 11-13 жовтня 2024 р.; 13-та Міжнародна конференція IEEE DESSERT, Афіни, Греція, 13–15 жовтня 2023 р.; IX Міжнародна науково-практична конференція «Теоретичні і експериментальні дослідження в сучасних технологіях матеріалознавства та

машинобудування», Луцьк, 30 травня – 1 червня 2023 р.; Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні тенденції та перспективи розвитку науки, освіти та технологій», Житомир, 10 квітня 2023 р.; Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених і студентів «Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості», Івано-Франківськ, 13 жовтня 2022 р.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 23 наукові праці, включаючи 7 статей у фахових наукових виданнях, 2 у наукових періодичних виданнях, які індексовано в наукометричній базі SCOPUS, 12 публікацій у матеріалах міжнародних та вітчизняних конференцій, 2 патенти України на корисну модель.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку літературних джерел, додатків та має 95 сторінок основного тексту. Робота проілюстрована 44 рисунками, включає 11 таблиць, перелік літературних джерел із 119 найменувань. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 151 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність, сформульовано мету й завдання досліджень, визначено об'єкт, предмет та методи досліджень, викладено наукову новизну, особистий внесок здобувача, практичне значення отриманих результатів та апробацію результатів дисертаційної роботи.

У першому розділі проведено аналіз сучасного стану автоматизації процесу виробництва спирту, зокрема ділянки приготування замісу та його водно-теплової обробки.

Проведений аналіз існуючих автоматичних систем керування показав недостатній рівень автоматизації на етапі приготування замісу та його водно-теплової обробки, оскільки системи керування цими процесами не можуть забезпечити стабільно високого рівня розчинення крохмалю у разі зміни складу і характеристик вхідного матеріального потоку. Встановлено, що ця стадія є важливою, оскільки спрямована на забезпечення рівномірного переведення крохмалю в розчинений стан за допомогою теплової обробки. Від ефективності проходження даного етапу залежать стабільність подальших етапів виробництва спирту. Корегування режимів роботи при приготуванні замісу і його водно-теплової обробки у разі виникнення складних конфліктних ситуацій, покладається на оператора.

Недостатній рівень автоматизації процесу приготування замісу і його водно-теплової обробки пояснюється наступними причинами. Процес приготування замісу супроводжується складними структурними змінами водно-зернової суміші під впливом мікробіологічних і термохімічних факторів, що спричиняє нестабільність процесу і ускладнює проведення контролю показників якості замісу та точне дотримання технологічних режимів. Тому відсутність ефективного автоматизованого контролю за показником якості замісу призводить до порушення регламентованих параметрів, погіршення якості спирту та перевитрат енергоресурсів.

Задачу отримання замісу стабільно високої якості необхідно вирішувати шляхом впровадження принципово нових підходів та алгоритмів керування процесом приготування замісу і його водно-теплової обробки, для яких критерієм керування є забезпечення необхідної якості замісу за умови мінімальних витрат енергетичних носіїв та зменшення втрат матеріальних і фінансових ресурсів.

Виходячи з цієї задачі пропонується дослідити матеріальні, енергетичні та інформаційні потоки в процесах приготування замісу і його водно-теплової обробки і

розробити нову систему керування цими процесами на основі використання показників якості замісу придатних для автоматичного керування процесом його приготування.

Другий розділ присвячений детальному аналізу процесу приготування замісу і його водно-теплової обробки з точки зору як їх спільної реалізації, так і визначенню показників контролю якості замісу, які були би придатними до використання в автоматичній системі керування.

Основними технологічними факторами процесу приготування зернових замісів є ступінь подрібнення зерна, співвідношення «зерно-вода» (гідромодуль), температура та тривалість водно-теплової обробки. Для кожного типу помелу потрібен індивідуальний тепловий режим, щоб уникнути втрат крохмалю через його неповне розчинення. Детальний розгляд етапів процесу приготування зернових замісів і його водно-теплової обробки показав доцільність їх об'єднання в комплексний процес (рис. 1). В цьому випадку створюються можливості для отримання напівпродукту із заданими показниками якості (рівень розчинення крохмалю в замісі) та значної мінімізації матеріальних і енергетичних ресурсів, необхідних для виробництва спирту.



Рис. 1. Інформаційна модель комплексного процесу приготування замісу і його водно-теплової обробки

Схема взаємозв'язку етапів приготування замісу і його водно-теплової обробки встановлює зв'язки між показниками якості замісу на виході із процесу, контрольованими керованими і некерованими контрольованими параметрами, а також наявними збуреннями (рис. 2).

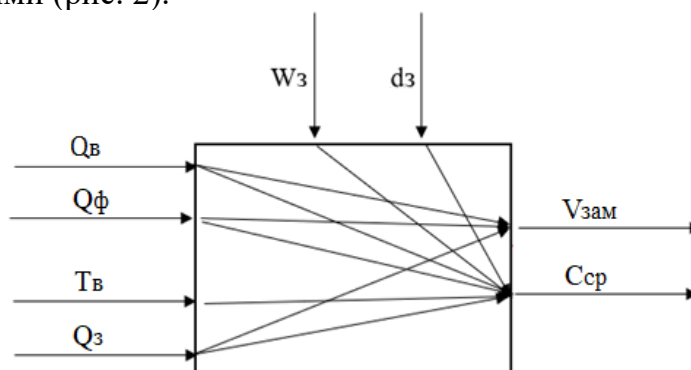


Рис. 2. Схема взаємозв'язку етапів приготування замісу і його водно-теплової обробки: W_3 -вологість зерна, d_3 -ступінь подрібнення, T_v -температура води, Q_z -витрата зерна, Q_v -витрата води, Q_f -витрата ферменту, $V_{зам}$ - об'єм замісу, $C_{сп}$ -концентрація розчиненої сухої речовини в замісі

На основі отриманої моделі, було встановлено необхідність вибору такого показника якості замісу замість традиційного – концентрація розчиненої в замісі сухої речовини, який був би технологічно інформативним, а також придатним для автоматичного контролю в реальному часі. Дійсно, традиційний показник якості замісу (концентрація сухої речовини в замісі) надає об'єктивну оцінку ступеня приготування замісу, проте не надається для умов автоматичного контролю через складність вимірювання. Як альтернативу запропоновано використовувати в'язкість та густину як непрямі параметри контролю концентрації крохмалю. Для цього у роботі досліджено залежності концентрації розчиненого крохмалю в замісі від його густини та в'язкості, як за даними літературних джерел, так і експериментальним шляхом, а також досліджено вплив температури на процес приготування замісу.

В'язкість замісу є інформативним параметром, що відображає ступінь клейстеризації та оцукрювання крохмалю, однак у більшості виробництв її не контролюють. Це ускладнює забезпечення стабільної якості напівпродукту та ефективності подальших стадій технологічного процесу. Відомо, що при нагріванні крохмалю в'язкість спочатку зростає, а після досягнення температури клейстеризації може знижуватись внаслідок руйнування крохмальної сітки. На ці зміни суттєво впливають дисперсність помелу та ферментні препарати. Недотримання умов якості підготовки замісу призводить до ускладнень у подальшій переробці, до зниження виходу спирту та перевитрат енергії. З огляду на це, доцільним є впровадження комплексної автоматизованої системи керування (КАСК), яка не тільки контролюватиме витрати зерна, води і ферментів, але і здійснюватиме регулювання якості вихідної суміші на основі поточного значення в'язкості. Така КАСК забезпечить стабільність технологічного процесу приготування замісу.

Для реалізації поставленої мети було досліджено зміну в'язкості та густини замісу залежно від температури при різних значеннях концентрації (рис. 3) Діапазон досліджених концентрацій становив від 10 до 60% сухих речовин з інтервалом 10% при зміні температури від 50 до 90 °С.

Проведене дослідження і аналіз параметрів процесу приготування замісу та його подальшого розварювання дозволило виокремити як показник якості замісу – його в'язкість як такий показник, що є більш чутливий до зміни концентрації крохмалю в замісі.

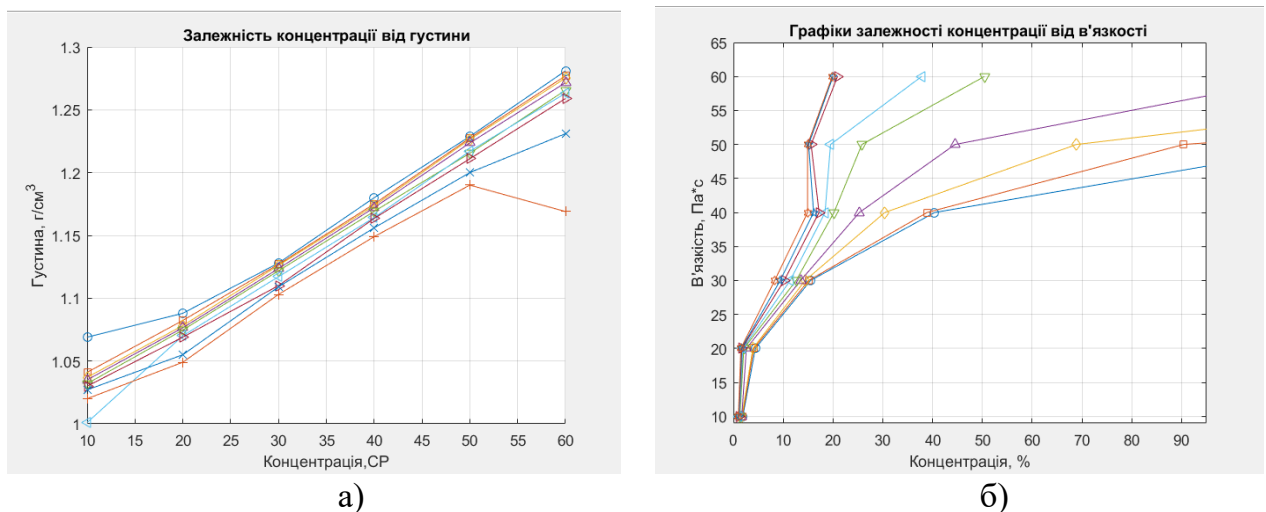


Рис. 3. Залежність густини (а) та в'язкості (б) замісу від його концентрації для різних температурних умов

За результатами попередніх досліджень нами було розроблено структуру системи

керування в'язкістю замісу, що забезпечила покращення якості керування процесом підготовки замісу шляхом підвищення стабільності параметрів напівпродукту після стадії приготування замісу (рис. 4).

Автоматичне приготування замісу із крохмалевмісної сировини здійснюється в чанку-змішувачі із мішалкою та пристроєм подачі пари для нагріву замісу. Автоматичне управління процесом приготування замісу проводять за допомогою системи керування, що складається із трьох контурів керування. Проведений аналіз впливу температури підтвердив доцільність її використання, як додаткового інформативного параметру для процесу приготування замісу та його водно-теплової обробки для досягнення заданої концентрації розчиненого крохмалю.

На основі отриманих закономірностей запропоновано триконтурну систему автоматичного регулювання (рис. 4):

- 1) перший контур забезпечує задане співвідношення ферменту та гарячої води в розчині деструктуратора крохмалю;
- 2) другий контур забезпечує задане співвідношення подрібненого зерна і водного розчину деструктуратора крохмалю;
- 3) третій контур забезпечує стабілізацію в'язкості крохмалевмісної маси шляхом регулювання температури T замісу за допомогою регулятора подачі пари.

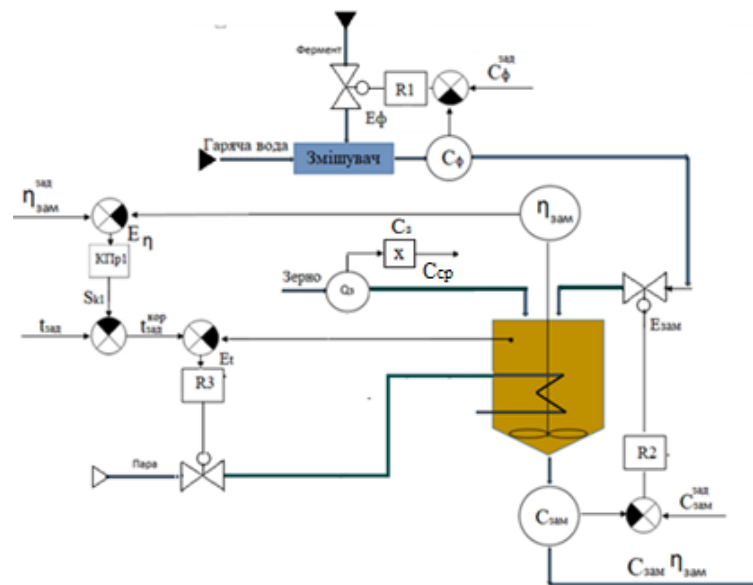


Рис. 4. Структурна схема системи автоматичного керування комплексним процесом приготування замісу і його водно-теплової обробки

В роботі було досліджено залежність споживаного струму мішалки від в'язкості суміші. При фіксованій напрузі зміна в'язкості впливає на навантаження приводу, що відображається в зміні струму. Це дозволяє здійснювати непрямий контроль в'язкості за струмом, що споживається мішалкою.

Обґрунтування і вибір показників контролю якості замісу, придатних для автоматичного керування процесом, дозволили розробити багатоконтурну систему керування комплексним процесом приготування замісу і його водно-тепловою обробкою.

У третьому розділі сформовано і досліджено динамічну модель комплексного процесу приготування замісу та його водно-теплової обробки, що забезпечує можливість кількісної оцінки ключових параметрів – концентрації крохмалю та об'єму

замісу. Модель описує зміну об'єму $V(t)$ та концентрації крохмалю в замісі $c(t)$ під дією змін вхідних потоків в умовах дії збурень (рис. 5).

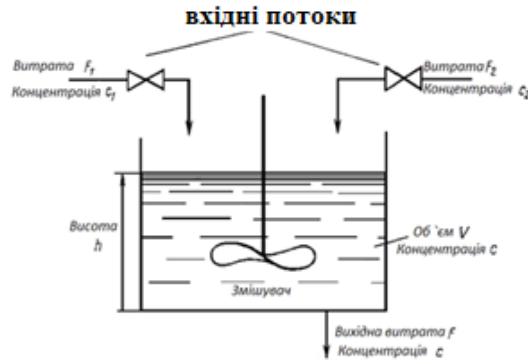


Рис. 5. Схема для побудови динамічної моделі змішування

Математична модель описує основні етапи комплексного процесу, що включає етапи подачі води з ферментом, введення в розчин подрібненого зерна для отримання замісу та подальшу його водно-теплову обробку. Рівняння балансу для змішувача:

$$\frac{dV(t)}{dt} = F_1(t) + F_2(t) - F(t), \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt}[c(t)V(t)] = c_1F_1(t) + c_2F_2(t) - c(t)F(t), \quad (2)$$

де $F_1(t)$ – витрата води з ферментом, $F_2(t)$ – витрата зернової маси, $F(t)$ – загальна витрата готового замісу, c_1 , c_2 – концентрації сухих речовин у вхідних потоках, $V(t)$ – об'єм замісу в змішувачі, $c(t)$ – концентрація крохмалю в замісі.

За умови розгляду стаціонарного режиму, коли всі параметри є сталими, витрати води з ферментом F_{10} , зерна F_{20} , замісу F_0 , об'єм змішувача V_0 і концентрація розчиненого крохмалю c_0 задовольняють рівняння

$$0 = F_{10} + F_{20} - F_0, \quad (3)$$

$$0 = c_1F_{10} + c_2F_{20} - c_0F_0, \quad (4)$$

$$F_0 = k \sqrt{\frac{V_0}{S}}.$$

та реакції системи на збурення:

$$F_1(t) = F_{10} + \mu_1(t), \quad (5)$$

$$F_2(t) = F_{20} + \mu_2(t), \quad (6)$$

$$V(t) = V_0 + \xi_1(t), \quad (7)$$

$$c(t) = c_0 + \xi_2(t), \quad (8)$$

де μ_1 і μ_2 – вхідні змінні (витрата зерна та води з ферментом);

ξ_1 і ξ_2 – змінні стану (об'єму замісу та концентрація розчиненого крохмалю).

Для подання системи у просторі стану проведемо лінеаризацію моделі:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (9)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2\theta} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{\theta} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{V_0} & \frac{1}{V_0} \\ \frac{c_1 - c_0}{V_0} & \frac{c_2 - c_0}{V_0} \end{bmatrix}, \quad x(t) = \begin{bmatrix} \xi_1(t) \\ \xi_2(t) \end{bmatrix}, \quad u(t) = \begin{bmatrix} \mu_1(t) \\ \mu_2(t) \end{bmatrix}$$

де θ – час заповнення змішувача.

Це дало змогу оцінити експоненціальну стійкість САК – при збуреннях змінні стану наближаються до рівноважного значення.

Систему автоматичного керування розглянуто як багатоканальний об'єкт керування (МІМО) з двома входами (витрати) та двома виходами (об'єм і концентрація). Це дозволяє враховувати взаємозв'язки каналів при синтезі регулятора.

Для реалізації автоматичного регулювання досліджено використання ПІД-регулятора (див. рис.6). Систему керування з ПІД-регуляторами змодельовано в середовищі MATLAB/Simulink.

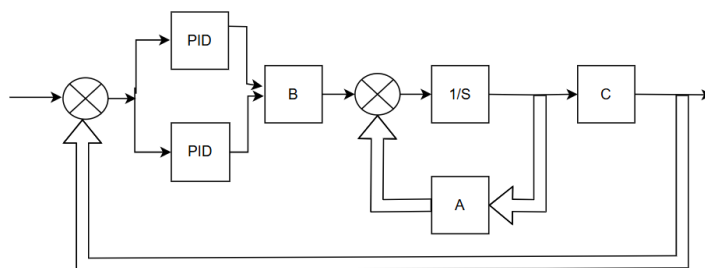


Рис. 6. Структурна схема реалізації системи керування з ПІД-регуляторами

Для симуляційної перевірки ефективності системи автоматичного керування процесом приготування замісу та його водно-теплової обробки були використані дані, що отримані в реальних виробничих умовах спиртових заводів – Луцького, Борокського (Львівська область) та Марилівського. На основі цих параметрів було побудовано математичну модель процесу змішування та сформовано варіанти для моделювання: для об'ємів замісу в чанку (1 м^3 ; $1,6 \text{ м}^3$; $1,3 \text{ м}^3$) і концентрації розчиненого крохмалю ($1,04 \text{ г/см}^3$; $1,09 \text{ г/см}^3$; $1,09 \text{ г/см}^3$).

Розглянуто три підходи до налаштування коефіцієнтів k_p , k_i , k_d регулятора для заданих об'ємів та концентрацій розчиненого крохмалю: метод Зіглера–Нікольса, метод відкритого контуру та автоматичне налаштування у Simulink з використанням блоку PID Controller. На рисунку 7 представлено перехідні характеристики, отримані із застосуванням вказаних методів.

Практичне дослідження динаміки процесу керування підготовкою замісу при використанні ПІД-регуляторів було проведено із використанням двох контролерів DS1104 фірми dSPACE в програмному середовищі MATLAB/Simulink. Структурні схеми математичних моделей, реалізованих в контролерах DS1104 представлено на рисунку 8.

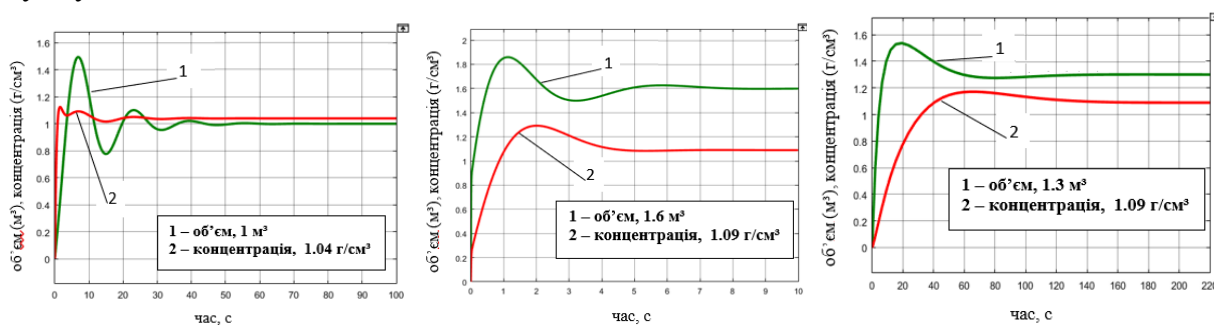


Рис. 7. Перехідні характеристики експериментів для об'єму 1 м^3 , $1,6 \text{ м}^3$, $1,3 \text{ м}^3$

Результати виконаних експериментальних досліджень процесу із використанням контролерів підтвердили наявність перерегулювання та значний час регулювання об'єму замісу та концентрації розчиненого крохмалю в системі із застосуванням ПІД-регуляторів, що в свою чергу призводить до надлишкових витрат вхідних матеріалів.

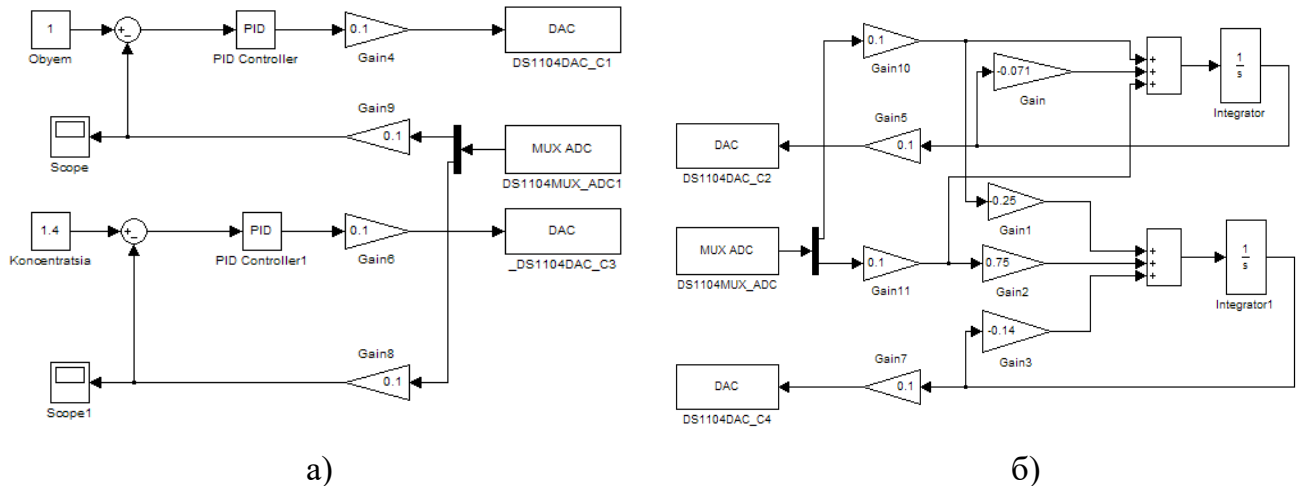


Рис. 8. Структурні схеми моделі керуючої частини (а) та об'єкта (б) у середовищі Simulink, реалізовані в двох контролерах DS1104 для симуляції системи керування процесом замісу в реальному часі

За результатами моделювання та фізичної симуляції із застосуванням контролерів підтверджено, що застосування класичного ПІД-регулятора у багатоконтурній системі (МІМО-системі) з наявними взаємозв'язками між каналами регулювання не дає можливості досягнути потрібної якості регулювання. В перехідних характеристиках спостерігається перерегулювання близько 15-20 % і збільшення часу стабілізації регульованих параметрів. Стабільність значення концентрації впливає на відсотковий вміст спирту, а забезпечення стабільного значення об'єму замісу на попередження інфікування замісу при утворенні його залишкових запасів. Тому для підвищення якості процесу керування обома параметрами запропоновано використати LQR-регулятор.

У *четвертому розділі* описано розробку системи автоматичного керування комплексним процесом приготування замісу і його водно-теплової обробки на основі LQR-регулятора. Проведені виробничі дослідження показали, що LQR-регулятор дозволяє ефективно розподіляти керуючі дії залежно від відхилень об'єму замісу в чанку та концентрації розчиненого крохмалю.

Новий закон регулювання побудовано на основі лінеаризованої математичної моделі у просторі станів:

$$\dot{x}(t) = A \begin{bmatrix} -\frac{1}{2\theta} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{\theta} \end{bmatrix} x(t) + B \begin{bmatrix} \frac{1}{c_1 - c_0} & \frac{1}{c_2 - c_0} \\ \frac{1}{v_0} & \frac{1}{v_0} \end{bmatrix} u(t) \quad (10)$$

Регулятор (LQR - linear quadratic regulator) дозволяє мінімізувати цільову функцію, за рахунок обрання відповідного закону регулювання параметрів об'єму замісу в чанку та концентрації розчиненого крохмалю в суслі, а також враховує взаємозв'язки між параметрами, покращує їх динаміку, забезпечує стабілізацію процесу та плавність перехідних режимів.

Для того, щоб система досягала заданих значень концентрації розчиненого крохмалю та об'єму замісу змінні стану $x(t)$ та керування $u(t)$ представлено, як суму цільового значення і відхилення:

$$x(t) = \bar{x} + y, \quad u = \bar{u} + v \quad (11)$$

Це дозволило звести систему до зручного вигляду з нульовим положенням рівноваги, якщо:

$$A\bar{x} + B\bar{u} = 0 \rightarrow \bar{u} = -B^{-1}A\bar{x} \quad (12)$$

Далі формуємо закон зворотного зв'язку:

$$u = \bar{u} - K(x - \bar{x}), \quad (13)$$

де K – матриця коефіцієнтів, яка визначається так, щоб мінімізувати функціонал якості:

$$J = \int_0^\infty [(x - \bar{x})^T Q (x - \bar{x}) + (u - \bar{u})^T R (u - \bar{u})] dt \quad (14)$$

де $Q = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} \\ q_{21} & q_{22} \end{bmatrix}$ і $R = \begin{bmatrix} r_1 & 0 \\ 0 & r_2 \end{bmatrix}$ – вагові матриці відхилень станів x (концентрація розчиненого крохмалю та об'єм замісу в чанку) та керувань u (витрати води з ферментом та зерна) від номінальних значень $\bar{x}$ та $\bar{u}$ відповідно.

Матриці Q і R встановлюють вплив точності керування і відхилення витрат на показник якості J . Для знаходження K потрібно розв'язати алгебраїчне рівняння Ріккаті, яке забезпечує формування закону оптимального зворотного зв'язку:

$$PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P = -Q \quad (15)$$

Розв'язування рівняння Ріккаті виконувалися в середовищі MATLAB. Це дозволило не лише сформулювати закон оптимального зворотного зв'язку, але і побудувати стабільну систему, яка точно і швидко досягає бажаних параметрів, навіть при наявності збурень. Проведене розв'язання дозволяє знайти матрицю керування, яка в результаті формує закон регулювання:

$$K = R^{-1}B^T P \quad (16)$$

З метою налаштування параметрів LQR-регулятора проведено моделювання процесу керування приготуванням замісу та його водно-теплової обробки для різних початкових умов (таблиця 3) та варіантів матриць ваг Q та R : класична методика використання одиничних матриць та підбір значення за методом Брісона. Під час симуляції використані наступні параметри процесу змішування: об'єм замісу 1 м^3 в чанку та концентрація розчиненого крохмалю $1,045 \text{ г/см}^3$.

Для розрахунку використано програмне середовище Matlab і вбудовану функцію $[K, P, e] = \text{lqr}(A, B, Q, R)$, яка передбачає введення вхідних матриць A , B та Q і R .

За результатами проведеної симуляції отримано такі перехідні характеристики:

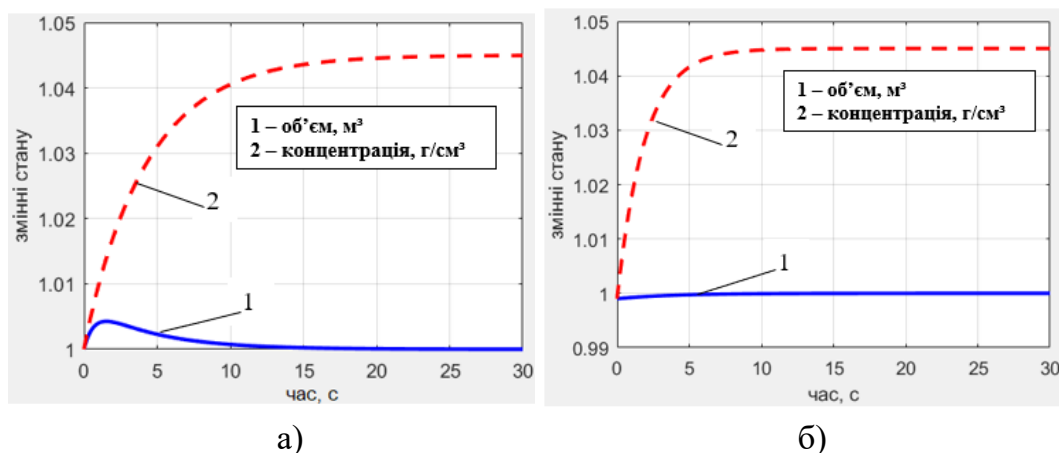


Рис. 9. Процес регулювання об'єму замісу в чанку та концентрації крохмалю в замісі для $\xi_1(t)_{ref} = 1$, $\xi_2(t)_{ref} = 1,045$ за класичною методикою (а) і за методом Брісона (б).

Аналіз перехідних характеристик показав, що розрахунок параметрів LQR-регулятора за допомогою вбудованих функцій MATLAB дає час регулювання близько 20 с, що перевищує очікуваний діапазон (2-5 с), з невеликим перерегулюванням, а

метод Брісона забезпечує повільне наближення параметрів системи до встановленого значення $\bar{x} = (1; 1,045)$.

Оскільки запропоновані методики не забезпечили очікуваного часу регулювання (2-5 с), було отримано нові параметри LQR-регулятора на основі нових значень коефіцієнтів зворотньої дії K , які були розраховані з урахуванням більшої ваги точності регулювання об'єму замісу. Розрахунки виконано в середовищі Matlab за допомогою функції $[K, P, e] = \text{lqr}(A, B, Q, R)$ при відповідних варіаціях матриць Q і R . Результати розрахунків подані в таблиці 1.

Таблиця 1

Зведені дані налаштування LQR-регулятора

№	Цільове значення	Вагові матриці		Матриця стабілізуючих контролюючих коефіцієнтів	Керуючий сигнал
	$\bar{x}$	Q	R	K	$\bar{u}$
1	$\bar{x} = (1.6; 1.04)$	$Q = \begin{pmatrix} 1 & -0.1 \\ -0.1 & 1 \end{pmatrix}$	$R = \begin{pmatrix} 0,001 & 0 \\ 0 & 0,001 \end{pmatrix}$	$K = \begin{pmatrix} 20.7291 & 18.9720 \\ 23.6260 & -20.3500 \end{pmatrix}$	$\bar{u} = \begin{pmatrix} 69,951 \\ 8,7245 \end{pmatrix}$
2	$\bar{x} = (1.6; 1.04)$	$Q = \begin{pmatrix} 1 & -0.1 \\ -0.1 & 1 \end{pmatrix}$	$R = \begin{pmatrix} 0,01 & 0 \\ 0 & 0,01 \end{pmatrix}$	$K = \begin{pmatrix} 6,5699 & 4,5022 \\ 7,2862 & -5,0084 \end{pmatrix}$	$\bar{u} = \begin{pmatrix} 22,059 \\ 2,8581 \end{pmatrix}$
3	$\bar{x} = (1.6; 1.04)$	$Q = \begin{pmatrix} 1.1 & -0.1 \\ -0,1 & 1,1 \end{pmatrix}$	$R = \begin{pmatrix} 0,3 & 0 \\ 0 & 0,3 \end{pmatrix}$	$K = \begin{pmatrix} 1,2030 & 0,2614 \\ 1,2532 & -0,3443 \end{pmatrix}$	$\bar{u} = \begin{pmatrix} 4,2598 \\ 0,8615 \end{pmatrix}$

За результатами серії експериментів з трьома наборами вагових коефіцієнтів (Таблиця 1) отримано перехідні характеристики зміни об'єму замісу та концентрації розчиненого крохмалю в замісі (див. рис.10).

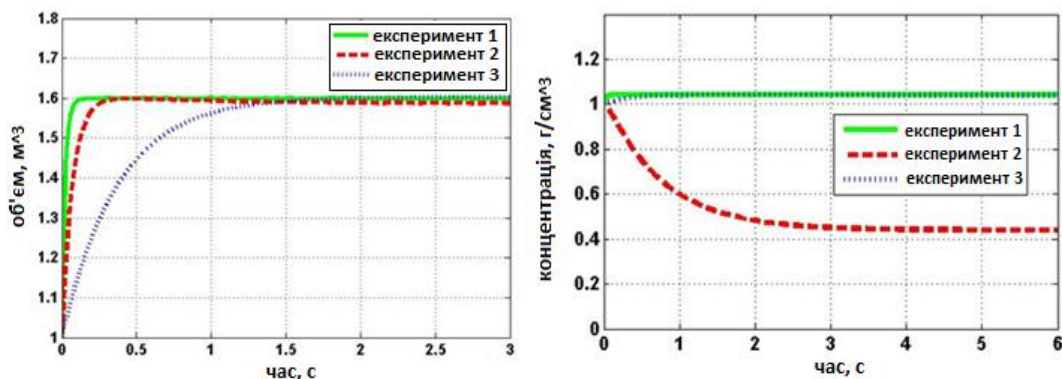


Рис. 10. Процес регулювання об'єму замісу в чанку та концентрації розчиненого крохмалю в замісі

Проведені експерименти, які передбачали налаштування LQR-регулятора при різних значеннях коефіцієнтів показали доцільність використання комбінованого методу розрахунку параметрів регулятора із врахуванням ваги точності регулювання об'єму та концентрації розчиненого крохмалю, оскільки саме такий метод дає можливість забезпечити потрібні характеристики якості керування процесом приготування замісу та його водно-теплової обробки.

Наступним етапом після налаштувань LQR-регулятора було його застосування у виробничих умовах спиртогорілчаних заводів України: спиртовий завод в м. Луцьку,

Марилівський спиртовий завод (Чернівецька обл.), ТОВ «Біопаливно-енергетична компанія» (м. Луцьк) та Борокський спиртовий завод (Львівська обл.). У таблиці 2 наведено значення вхідних експериментальних параметрів та обчислених значень для двох підприємств.

Таблиця 2

Експериментальні та розрахункові дані

№	Назва заводу	Дані з виробництва	Обраховані вхідні параметри
1	2	3	4
1	ТОВ «ВЕСТ ВЕЙ» (Луцький спиртовий завод)	$F_{10} = 0,0022 \text{ m}^3/\text{c}$ $F_{20} = 0,0018 \text{ m}^3/\text{c}$ $F_0 = 0,0020 \text{ m}^3/\text{c}$ $c_1 = 1 \text{ г/см}^3$ $c_2 = 1,037 \text{ г/гм}^3$ $c_0 = 1,02 \text{ г/см}^3$ $V_0 = 6 \text{ m}^3$	$\theta = 3000$ $A = [-0.00016 \ 0; 0 \ -0.00016]$ $B = [1 \ 1; -0.0033 \ 0.0028]$ $(C1-c0)/V0 = -0,0033$ $(C2-c0)/V0 = 0,0028$
2	Марилівський спиртовий завод	$F_{10} = 0,0176 \text{ m}^3/\text{c}$ $F_{20} = 0,00874 \text{ m}^3/\text{c}$ $F_0 = 0,01 \text{ m}^3/\text{c}$ $c_1 = 1 \text{ г/см}^3$ $c_2 = 1,363 \text{ г/см}^3$ $c_0 = 1,040 \text{ г/см}^3$ $V_0 = 1,2 \text{ m}^3$	$\theta = 120$ $\theta = \frac{1,2}{0.01} = 120$ $A = [-0.0041 \ 0; 0 \ -0.0041]$ $B = [1 \ 1; -0.0033 \ 0.323]$ $(C1-c0)/V0 = -0,033$ $(C2-c0)/V0 = 0,323$

Випробування LQR-регулятора у виробничих умовах Луцького та Марилівського спиртового заводу були проведені в режимі реального часу із подальшим аналізом результатів в середовищі MATLAB. Загальний вигляд стадії приготування замісу на Луцькому спиртзаводі, яка є об'єктом керування в досліджуваній системі з LQR-регулятором, зображена на рисунку 11.



Рис. 11. Стадія приготування замісу на Луцькому спиртовому заводі
концентрацію розчиненого крохмалю підтримували на рівні 15-20%, температуру замісу підтримували в межах 50-90°C (для оптимальної дії ферментних препаратів

таких як целюлоза і λ -амілаза які надходять у воду, що подається в чанок) і процес перемішування триває від 15 до 30 хв. Після чого заміс помпою подається у відділення гідроферментативної обробки сировини.

В процесі експериментальних досліджень були відпрацьовані оптимальні технологічні режими з застосуванням енергозберігаючої технології спиртових бражок при низькотемпературній водно-тепловій та термоферментативній обробці зернової сировини з використанням концентрованих ферментів селективної дії, а також визначено вимоги до якості регулювання об'єму замісу та концентрації розчиненого крохмалю, що також створює необхідні умови для подальшого широкомасштабного впровадження цієї технології на заводах галузі.

На основі зібраних експериментальних даних з Луцького та Марилівського спиртових заводів проведено моделювання процесу керування стадією замісу в MATLAB. Вибрані результати моделювання подано на рис. 12.

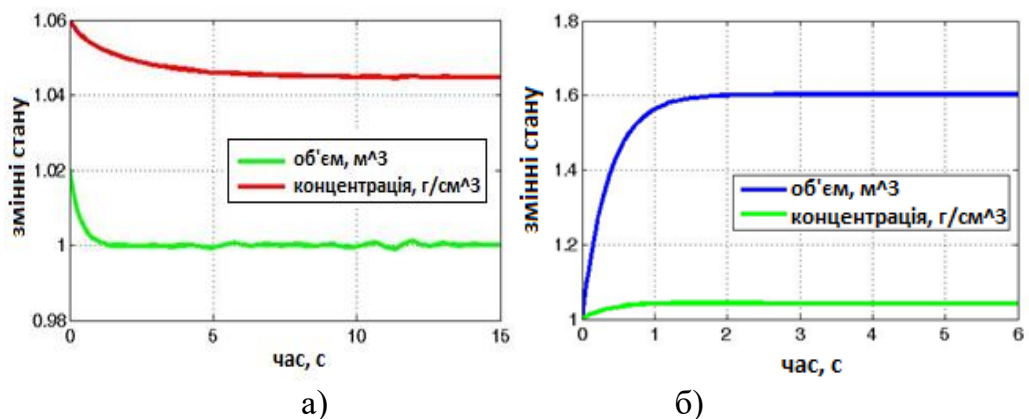


Рис. 12. Процес регулювання об'єму та концентрації крохмалю в замісі для $\bar{x} = (1; 1,045)$, $\bar{x} = (1,6; 1,04)$ під час налаштування регулятора

За результатами проведеного моделювання були сформовані закони регулювання для системи керування процесом приготування замісу та його водно-теплової обробки із застосуванням LQR-регулятора для Марилівського (стрічка 1 в таблиці 3) та Луцького (стрічка 2 в таблиці 3) спиртових заводів.

Таблиця 3

Зведені дані налаштування LQR-регулятора для спиртогорілчаних заводів

№	Цільове значення	Вагові матриці		Матриця стабілізуючих контролюючих коефіцієнтів	Керуючий сигнал
	$\bar{x}$	Q	R	K	$\bar{u}$
1	$\bar{x} = (1; 1,045)$	$Q = \begin{pmatrix} 1,1 & -0,1 \\ -0,1 & 1,1 \end{pmatrix}$	$R = \begin{pmatrix} 0,3 & 0 \\ 0 & 0,3 \end{pmatrix}$	$K = \begin{pmatrix} 1,5376 & -1,2587 \\ 1,1357 & 1,4195 \end{pmatrix}$	$\bar{u} = \begin{pmatrix} 2,8455 \\ 8,7245 \end{pmatrix}$
2	$\bar{x} = (1,6; 1,04)$	$Q = \begin{pmatrix} 1,1 & -0,1 \\ -0,1 & 1,1 \end{pmatrix}$	$R = \begin{pmatrix} 0,3 & 0 \\ 0 & 0,3 \end{pmatrix}$	$K = \begin{pmatrix} 1,2030 & 0,2614 \\ 1,2532 & -0,3443 \end{pmatrix}$	$\bar{u} = \begin{pmatrix} 4,2598 \\ 0,8615 \end{pmatrix}$

Отримані результати демонструють ефективність LQR-регулятора: перехідні процеси відбуваються без коливань і перерегулювання, забезпечуючи швидке

досягнення заданих значень об'єму та концентрації. Розраховані коефіцієнти зворотного зв'язку K для відповідних вагових матриць Q і R гарантують стабільність системи та точність регулювання. Структура цих матриць визначає пріоритетність параметрів: Q впливає на важливість станів, а R – на інтенсивність керування.

Попередні розрахунки LQR-регулятора враховували рівнозначне керування об'ємом замісу та концентрацією розчиненого крохмалю. Втім, з огляду на технологічні особливості процесу, було встановлено, що стабілізація об'єму є більш пріоритетною. Зокрема, коливання об'єму можуть призводити до налипання замісу на стінки, інфікування продукту та зриву виробництва. Натомість зміни концентрації більше впливають на вихід спирту або ускладнюють транспортування сусла.

Для практичного доведення цього твердження виконано моделювання із різними ваговими коефіцієнтами в матрицях Q та R . Окремі зведені дані представлені для Луцького спиртового заводу, що подано у табл. 4.

Таблиця 4

Зведені дані налаштування LQR-регулятора для Луцького спиртового заводу

№	Цільове значення	Вагові матриці		Матриця стабілізуючих контролюючих коефіцієнтів	Керуючий сигнал
	$\bar{x}$	Q	R	K	$\bar{u}$
1	$\bar{x} = (1.6; 1.04)$	$Q = \begin{pmatrix} 0,2 & 0,1 \\ 0,1 & 1,1 \end{pmatrix}$	$R = \begin{pmatrix} 0,3 & 0 \\ 0 & 0,3 \end{pmatrix}$	$K = \begin{pmatrix} 0,4487 & 0,2614 \\ 0,4709 & -0,1895 \end{pmatrix}$	$\bar{u} = \begin{pmatrix} 0,2878 \\ 0,2740 \end{pmatrix}$
2	$\bar{x} = (1.6; 1.04)$	$Q = \begin{pmatrix} 1,1 & 0,1 \\ 0,1 & 0,2 \end{pmatrix}$	$R = \begin{pmatrix} 0,03 & 0 \\ 0 & 0,03 \end{pmatrix}$	$K = \begin{pmatrix} 4,119 & 0,570 \\ 4,187 & -0,491 \end{pmatrix}$	$\bar{u} = \begin{pmatrix} 2,497 \\ 2,490 \end{pmatrix}$

Динаміка регулювання параметрів об'єму замісу та концентрації розчиненого крохмалю для Луцького спиртового заводу подані на рис. 13.

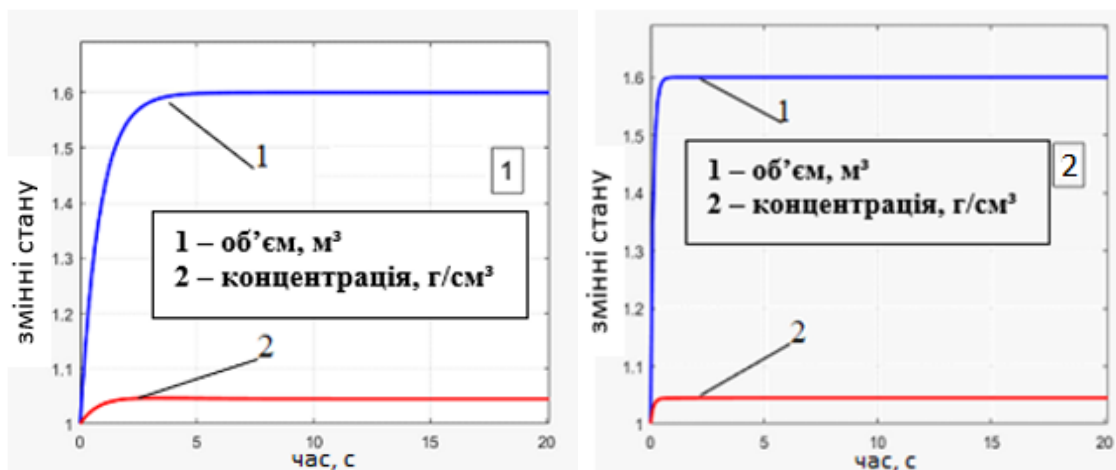


Рис. 13. Процес регулювання об'єму та концентрації крохмалю в замісі за умови врахування пріоритетності параметрів

Аналіз отриманих перехідних характеристик підтвердив, що врахування пріоритетності об'єму під час визначення коефіцієнтів матриці Q забезпечує кращі

параметри якості процесу регулювання. Зокрема, час регулювання становить від 0,5 до 5 с залежно від вагових коефіцієнтів, відсутні коливання та перерегулювання, розраховані коефіцієнти зворотного зв'язку К забезпечили точне досягнення заданих значень об'єму та концентрації крохмалю в замісі.

Таким підходом забезпечується ефективна автоматизація процесу приготування замісу із зернової сировини та його водно-теплова обробка із урахуванням технологічних особливостей процесу виробництва спирту.

У **висновках** подано наукові та практичні результати дисертаційної роботи.

У **додатках** наведені залежності густини, в'язкості і концентрації сухих речовин від температури, моделі системи керування процесом приготування замісу та його водно-теплової обробки з ПІД-регулятором в програмному середовищі Matlab / Simulink, алгоритм для оптимізації пошуку параметрів LQR-регулятора, патенти на корисну модель, а також представлені акти впровадження отриманих результатів дисертаційних досліджень.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертації наведене теоретичне узагальнення та нове рішення науково-прикладної задачі створення ефективної системи автоматичного керування процесом приготування замісу і його водно-теплової обробки.

Виконані в дисертаційній роботі дослідження дали змогу зробити наступні висновки:

1. Аналіз існуючого стану автоматизації на ділянках приготування спирту шляхом отриманих залежностей між концентрацією сухих речовин, густиною та в'язкістю замісу дав змогу створити ефективну систему автоматичного керування процесом приготування замісу і його водно-теплової обробки. Розроблені алгоритми дали змогу об'єднати всі стадії процесу в єдину автоматизовану систему.

2. За результатами експериментальних досліджень сформовано залежність концентрації розчиненого крохмалю в замісі від густини, в'язкості, а також температури, що дало можливість обрати координати керування та розробити багатоконтурну систему керування процесом приготування замісу і його водно-теплової обробки.

3. Запропонований підхід до моделювання процесу приготування замісу та його водно-теплової обробки забезпечив можливість синтезу керуючих впливів і кількісну оцінку інформативних параметрів: концентрації та об'єму замісу. Для ефективного контролю в'язкості замісу використано непрямий метод на основі вимірювання потужності мішалки.

4. Застосування розробленої системи автоматичного керування взаємоз'язаним процесом дало можливість підвищити ефективність технологічного процесу та якість суслу.

5. За результатами моделювання, а також експериментальних досліджень системи керування з взаємопов'язаними контурами регулювання об'єму та концентрації розчиненого крохмалю замісу встановлено, що застосування ПІД-регулятора в цій системі не забезпечує потрібні параметри якості в динамічних режимах.

6. Математичну модель системи керування процесом приготування замісу із застосуванням ПІД-регуляторів реалізовано в контролерах DS1104 фірми dSPACE та виконано експериментальні дослідження розробленої фізичної моделі в реальному часі. За результатами цих досліджень встановлено, що система керування з ПІД-регуляторами не забезпечує потрібної точності регулювання об'єму та концентрації

розчиненого крохмалю в замісі, що обмежує його застосування в багатоконтурній системі керування.

7. Застосування LQR-регулятора в автоматизованій системі автоматичного керування процесом приготування замісу та його водно- теплової обробки, а також його налаштування із врахуванням пріоритетності параметрів регулювання об'єму замісу забезпечують покращення показників якості, зокрема підвищення швидкодії регулювання об'єму та концентрації розчиненого крохмалю в замісі.

Таким чином виконані в дисертаційній роботі дослідження є подальшим розвитком теорії автоматизації технологічного процесу виготовлення етилового спирту, що в сукупності дає змогу створити автоматизовану систему керування процесом приготування замісу і його водно-теплової обробки. Розроблені підходи з використанням LQR-регулятора можуть бути поширені і на інших спиртових заводах та дають можливість зменшити витрати ферменту, витрати енергії та досягти підвищення загальної ефективності процесу приготування замісу та його водно-теплової обробки до 5 %.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Gumeniuk L., Markina L., Satsyk V., Humeniuk P., Lashch A. Application of multi-agent programming for modeling the viscosity state of mash in alcohol production. *Informatyka, Automatyka, Pomiarы w Gospodarce i Ochronie Środowiska*. 2025. Vol. 15, No. 1. P. 27–32.
2. Markina L., Palchevskiy B., Hrudetskiy R., Smoliankin O., Melnychuk Y., Khrystynets N. Optimization of Ethanol Production Using State-Space Modeling and Optimal Control Technology, 2023 13th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT), Athens, Greece, 2023, pp. 38-45.
3. Пальчевський Б. О., Маркіна Л. М., Сацик В. О. Вибір показників якості підготовки крохмалевмісного замісу автоматичного керування процесом. *Перспективні технології та прилади*, м. Луцьк, грудень 2024 р. Луцьк: ЛНТУ, 2024. С. 111-117.
4. Пальчевський Б. О., Маркіна Л. М. Інтелектуальна система керування процесом приготування замісу і його водно-теплової обробки при виробництві спирту. *Наукові нотатки*, Вип. 75, Луцьк, 2023. С. 22-26.
5. Пальчевський Б. О., Маркіна Л. М. Оптимізація процесу керування приготуванням замісу в спиртовому виробництві. *Перспективні технології та прилади*, Вип. 20, м. Луцьк, червень 2022 р. Луцьк: ЛНТУ, 2022. С. 82-87.
6. Маркіна Л. М., Сацик В. О., Смолянкін О. О. Використання нечіткої логіки в системі автоматичного регулювання концентрації замісу при виробництві спирту. *Перспективні технології та прилади*, Вип. 19, м. Луцьк, грудень 2021 р. Луцьк: ЛНТУ, 2021. С. 78-84.
7. Смолянкін О. О., Маркіна Л. М. Моделювання процесу замісу у змішувальному баку при виробництві спирту. *World Science*, № 6 (34), Vol. 2, June 2018. С. 52-56.
8. Кузьмич О. І., Маркіна Л. М., Якимчук Л. М. Моделювання та розробка системи керування процесом змішування на базі процесу водно-теплової обробки при виробництві спирту. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*, № 30-31, Луцький НТУ, 2018. С. 220-227.
9. Маркіна Л. М., Городинський Д. С. Методи нечіткої логіки в управлінні процесом водно-теплової обробки при виробництві спирту. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*, № 12, 2013. С. 123-128.
10. Мачуга О. І., Решетило О. М., Смолянкін О. О., Маркіна Л. М., Сацик В.О. Аспекти підвищення ефективності виробництва спирту завдяки автоматизації технологічного

процесу приготування замісу. Актуальні проблеми автоматизації та управління, матер. XII Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф., м. Луцьк, 30 листопада 2024 р., Вип. 12, Луцьк, 2024. С. 41-44.

11. Маркіна Л. М., Гуменюк Л. О., Сацик В. О., Гуменюк П. О. Застосування штучного інтелекту в моделюванні в'язкості замісу спиртового виробництва на основі мультиагентних систем. Збірник наукових праць VIII Міжнародної науково-технічної конференції з проблем вищої освіти і науки ТК-2024, Луцьк, Україна, 28–30 травня 2024 р. Луцьк: ЛНТУ, 2024. С. 11-13.

12. Маркіна Л. М. PID регулятори в системах автоматичного регулювання. Прогресивні напрямки розвитку автоматизованих технологічних комплексів, зб. наук. праць VIII Міжнар. наук.-техн. конф. ТК-2024, м. Луцьк, 28-30 травня 2024 р. Луцьк: ЛНТУ, 2024. С. 39-40.

13. Lyudmila Markina, Viktor Satsyk, Oleksandr Reshetylo, Roman Hrudetskyi, Oleh Smoliankin and Nadiia Kuts. "Effective Ethanol Production Based on Intelligent Robust Control", Published in: Conference Program – 2024 13th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT), Athens, Greece, October 11-13, 2024, Conference Timetable: p.2 - FRIDAY 11 OCTOBER 2024, paper ID 129.

14. Пальчевський Б. О., Маркіна Л. М. Основні принципи автоматичного керування процесом підготовки крохмалевмісного замісу для виробництва спирту. Теоретичні і експериментальні дослідження в сучасних технологіях матеріалознавства та машинобудування, матер. IX Міжнар. наук.-практ. конф., м. Луцьк, 30 травня-1 червня 2023. С. 30-33.

15. L. Markina, B. Palchevskyi, R. Hrudetskyi, O. Smoliankin, Y. Melnychuk and N. Khrystynets, "Optimization of Ethanol Production Using State-Space Modeling and Optimal Control Technology," Published in: Conference Program - 2023 13th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT), Athens, Greece, October 13-15, 2023, Conference Timetable: p.2 - FRIDAY 13 OCTOBER 2023, paper ID 6224.

16. Маркіна Л. М. Комп'ютерні технології для дослідження систем автоматичного регулювання. Сучасні тенденції та перспективи розвитку науки, освіти та технологій, зб. тез доп. міжнар. наук.-практ. конф., Житомир, 10 квітня 2023. С. 57-58.

17. Маркіна Л. М. Особливості автоматизації водно-теплової обробки при виробництві спирту. Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених і студентів «Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості», 13 жовтня 2022 р., Івано-Франківськ.

18. Сацик В. О., Маркіна Л. М., Плахотна А. О. Роль виконавчих механізмів у формуванні закону регулювання на прикладі водно-теплого балансу змішувача при виробництві спирту. Міжнародна науково-практична інтернет-конференція молодих учених та студентів «Актуальні проблеми автоматизації та управління». – Вип. 4. Луцьк: Луцький НТУ, 2016. С. 47-53.

19. Маркіна Л. М., Сацик В. О. Дослідження рівнів автоматизації процесу виробництва спирту на якість кінцевого продукту Міжнародна науково-практична інтернет-конференція молодих учених та студентів «Актуальні проблеми автоматизації та управління». – Вип. 3. Луцьк: Луцький НТУ, 2015. С. 17-21.

20. Маркіна Л. М. Аналіз автоматизованих систем управління при виробництві спирту. Актуальні проблеми автоматизації та управління : Всеукр. наук.-практ. інтернет-конф. молодих учених та студентів. Вип. 1. Луцьк : Луцький НТУ, 2014. С. 82-86.

21. Маркіна Л. М. Модель регулювання концентрації зернових замісів. Актуальні проблеми автоматизації та управління : Всеукр. наук.-практ. інтернет-конф. молодих учених та студентів. Вип. 1. Луцьк : Луцький НТУ, 2014. С. 70-76.
22. Пальчевський Б. О., Маркіна Л. М. Спосіб автоматичного керування приготуванням замісу при виробництві етилового спирту із крохмалєвмісної сировини: пат. № UA151663; заявка № u202200653; заявл. 14.02.2022; опубл. 25.08.2022, Бюл. № 34.
23. Пальчевський Б. О., Маркіна Л. М. Спосіб автоматичного керування приготуванням замісу при виробництві етилового спирту із крохмалєвмісної сировини: пат. № UA152727; заявка № u202202896; заявл. 12.08.2023; опубл. 05.04.2023, Бюл. № 14.

АНОТАЦІЯ

Маркіна Л.М. Автоматизація процесів приготування замісу із зернової сировини та його водно-теплової обробки у спиртовому виробництві. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 «Автоматизація процесів керування». – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2025.

Дисертаційна робота присвячена підвищенню ефективності виготовлення етилового спирту із зернової суміші шляхом забезпечення стабільності параметрів напівфабрикату на початковій стадії приготування замісу з його водно-тепловою обробкою.

Процес приготування замісу супроводжується сильними збуреннями, що ускладнює точне дотримання показників якості замісу. Відсутність ефективного автоматизованого контролю за показниками якості замісу в переважній більшості призводить до порушення технологічних режимів на наступних ділянках, що знижує якість етилового спирту та викликає перевищення витрат енергоресурсів та вихідних матеріалів. Тому задача автоматизації процесів приготування замісу із зернової сировини та його водно-теплової обробки у спиртовому виробництві є актуальною, що дозволить зменшити витрати вхідних матеріалів та забезпечить стабільність наступних етапів виробництва.

У роботі проаналізовано стан автоматизації на ділянках приготування спирту та отримано залежність між концентрацією сухих речовин, густиною та в'язкістю, що дозволило створити ефективну систему керування процесом приготування замісу і його водно-теплової обробки.

За результатами експериментальних досліджень сформовано залежність концентрації розчиненого крохмалю в замісі від густини, в'язкості, а також температури, що дало можливість обрати координати керування та розробити багатоконтурну систему керування процесом приготування замісу і його водно-теплової обробки.

Проведено порівняльний аналіз функціональних схем автоматизації процесу приготування замісу та розроблено і реалізовано алгоритми, що дали змогу об'єднати всі стадії приготування замісу та його водно-теплової обробки в єдину автоматизовану систему.

Запропоновано підхід моделювання процесу приготування замісу та його водно-теплової обробки, а саме створено узагальнену модель змішування як об'єкту керування, забезпечив можливість синтезу керуючих впливів і кількісної оцінки інформативних параметрів: концентрації крохмалю та об'єму замісу.

Використано споживану потужність мішалки як непрямий метод вимірювання в'язкості, що забезпечило можливість ефективного контролю показника, який є критично важливим для стабільності процесу приготування замісу.

За результатами проведених експериментів підтверджено доцільність урахування температури та в'язкості в системі регулювання процесу приготування замісу та водно-теплової обробки.

Вперше розроблена систему автоматичного керування комплексним процесом приготування замісу і його водно-теплової обробки, що дало можливість підвищити ефективність технологічного процесу та якість напівфабрикату.

Проведено дослідження системи керування з застосуванням ПІД-регулятора і LQR-регулятора, що дозволило обрати закон регулювання який забезпечує точність регулювання та підвищує якість керування у динамічних режимах.

Синтезовано LQR-регулятор для автоматизованої системи керування процесом приготування замісу та його водно-теплової обробки і проведено оптимізацію його параметрів, що забезпечило покращення показників якості системи керування та підвищило швидкодію регулювання об'єму і концентрації розчиненого крохмалю в замісі.

Отримані рішення застосовані у виробничих умовах (зокрема на Луцькому, Марилівському та Борокському спиртових заводах), що підтвердило зниження витрат зерна, ферментів і енергії, а також підвищення загальної ефективності процесу до 5% за рахунок стабілізації параметрів замісу та оптимізації водно-теплової обробки.

Ключові слова: заміс, водно-теплова обробка, концентрація розчиненого крохмалю, система автоматичного керування, регулятор, математична модель, алгоритм.

ABSTRACT

Markina L.M. Automation of processes of kneading from grain raw materials and its water-heat treatment in alcohol production. - Qualifying scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences in the specialty 05.13.07 "Automation of control processes." – National Lviv Polytechnic University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2025.

The dissertation is devoted to improving the efficiency of ethyl alcohol production from grain mixtures by ensuring the stability of semi-finished product parameters at the initial stage of mash preparation with its water-thermal treatment.

The mash preparation process is accompanied by strong disturbances, which complicates the accurate compliance with mash quality indicators. The lack of effective automated control over the quality indicators of the mash in the vast majority of cases leads to a violation of technological modes at subsequent stages, which reduces the quality of ethyl alcohol and causes an excess consumption of energy resources and raw materials. Therefore, the task of automating the processes of preparing mash from grain raw materials and its water-thermal treatment in alcohol production is relevant, which will reduce the consumption of input materials and ensure the stability of subsequent stages of production.

The paper analyzes the state of automation in alcohol preparation areas and obtains a relationship between the concentration of dry substances, density, and viscosity, which made it possible to create an effective system for controlling the process of preparing mash and its water-thermal treatment.

Based on the results of experimental studies, the dependence of the concentration of

dissolved starch in the mash on density, viscosity, and temperature was established, which made it possible to select control coordinates and develop a multi-loop control system for the mash preparation process and its water-thermal treatment.

A comparative analysis of functional diagrams for automating the dough preparation process was conducted, and algorithms were developed and implemented that made it possible to combine all stages of dough preparation and its water-thermal treatment into a single automated system.

An approach to modeling the dough preparation process and its water-heat treatment was proposed, namely, a generalized mixing model was created as a control object, which made it possible to synthesize control influences and quantitatively evaluate informative parameters: starch concentration and dough volume.

The power consumption of the mixer is used as an indirect method of measuring viscosity, which has made it possible to effectively control this indicator, which is critical for the stability of the dough preparation process.

The results of the experiments confirmed the feasibility of taking into account temperature and viscosity in the system for controlling the dough preparation and water-heat treatment process.

For the first time, an automatic control system was developed for the complex process of dough preparation and its water-heat treatment, which made it possible to increase the efficiency of the technological process and the quality of the semi-finished product.

A study of the control system using a PID-controller and an LQR-controller was conducted, which made it possible to select a control law that ensures control accuracy and improves control quality in dynamic modes.

An LQR controller was synthesized for the automated control system of the dough preparation process and its water-thermal treatment, and its parameters were optimized, which improved the quality indicators of the control system and increased the speed of regulation of the volume and concentration of dissolved starch in the dough.

The solutions obtained were applied in production conditions (in particular at the Lutsk, Marylivka, and Boroksky distilleries), which confirmed a reduction in grain, enzyme, and energy costs, as well as an increase in the overall efficiency of the process by up to 5% due to the stabilization of mash parameters and optimization of water and heat treatment.

Keywords: mash, water-heat treatment, concentration of dissolved starch, automatic control system, regulator, mathematical model, algorithm.

Підписано до друку 10.08.2025 р. Формат 60х84 1/16.
Ум. друк. арк. 0,75. Замовлення № 5. Наклад 100. Папір офісний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк – ВІП ЛНТУ
43018 м. Луцьк, вул. Львівська, 75