

DOI: <https://doi.org/10.36910/4293-52779-2025-17-02-06>
УДК 681.5:66.063.8

Маркіна Л.М.
старший викладач
ORCID: 0000-0003-0735-0743

Луцький національний
технічний університет / Україна

Сацик В.О.
канд. с.-г. наук, доцент
ORCID: 0000-0002-7132-3363

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ВИРОБНИЦТВА ЕТАНОЛУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПІДХОДУ У ПРОСТОРІ СТАНІВ

***Анотація:** у даній роботі розглянуто процес приготування замісу, який може бути використаний для оптимізації виробництва харчового та паливного етанолу. Розроблено автоматичну систему оптимального керування процесом підготовки суміші, що базується на вимірюванні витрат сировини та концентрації суміші, а також регулюванні подачі води. Запропонований контролер забезпечує підтримання необхідного рівня суміші шляхом зміни витрати потоків. Змінюючи витрати компонентів, оптимальний контролер підтримує сталу концентрацію суміші та стабілізує потоки. Розроблений удосконалений оптимальний контролер базується на робастному керуванні нелінійним процесом, що забезпечує більш стабільну роботу системи, підвищення якості замісу та кінцевого етанольного продукту, плавні переходи між режимами та економію енергетичних витрат.*

***Ключові слова:** оптимальне керування, динамічне моделювання, виробництво етанолу, система у просторі станів.*

ВСТУП, ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Сучасна промисловість характеризується високим енергетичним попитом, що зумовлений значним споживанням енергії та палива в технологічних процесах. Особливо це проявляється у виробництві етанолу, яке традиційно є матеріало- та енергоємним, потребує переробки великих обсягів рослинної сировини та супроводжується суттєвими енерговитратами на реалізацію технологічних операцій. Висока собівартість продукції, складність утилізації відходів та значні інвестиції у виробничі потужності знижують рентабельність галузі та стримують її розвиток.

Зростаючий інтерес до етанолу як альтернативного паливного ресурсу обумовлений необхідністю зменшення залежності від викопних енергоносіїв, зниження рівня атмосферного забруднення та протидії глобальному потеплінню. Біоетанол розглядається як перспективний компонент автомобільного палива завдяки відновлюваній сировинній базі, високому октановому числу та можливості комбінованого використання з традиційними

видами пального. Однак економічна доцільність його виробництва значною мірою визначається ефективністю технологічних процесів, що особливо актуально для підприємств малої та середньої потужності. Попри нижчі капітальні витрати та швидшу окупність, такі підприємства часто виявляються неконкурентоспроможними через високі матеріальні та енергетичні витрати на одиницю продукції.

Одним із ключових етапів виробництва етанолу є процес приготування замісу, який формує якісні характеристики напівпродукту та впливає на ефективність подальших стадій гідролізу та зброджування. Параметри зерново-водної суміші під час водно-теплової обробки зазнають значних структурних змін під впливом температури, мікробіологічних і термохімічних процесів, що ускладнює підтримання стабільних технологічних режимів. Традиційні системи автоматичного керування, засновані на регулюванні подачі води та контролі витрат сировини, не забезпечують необхідної точності підтримання концентрації замісу, не компенсують динамічні зміни процесу та не гарантують оптимального енергоспоживання.

Відсутність ефективного оперативного контролю показників якості замісу часто призводить до порушення регламентів, погіршення характеристик подальших стадій виробництва та зростання витрат енергоресурсів і ферментних препаратів. Традиційні методи визначення концентрації розчинених речовин є трудомісткими та непридатними для використання у реальному часі, що обумовлює необхідність пошуку інформативних технологічних параметрів, придатних для автоматизованих систем керування.

Таким чином, постає завдання розроблення ефективної системи автоматичного керування процесом приготування замісу, яка б забезпечувала стабілізацію технологічного процесу в умовах збурень, підтримання необхідної концентрації замісу, зниження енергоспоживання та підвищення економічної ефективності виробництва. Вирішення зазначеної проблеми можливе шляхом застосування математичного моделювання та побудови динамічної моделі у просторі станів, що дозволяє враховувати нелінійність процесу та забезпечує прогнозовану реакцію системи на збурення.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Проблематика підвищення ефективності виробництва етанолу та розширення сфер його застосування як альтернативного палива відображена у значній кількості зарубіжних досліджень. У роботах [1-5, 8, 11-14] розглядаються екологічні та економічні переваги використання біоетанолу, зокрема його роль у зниженні викидів парникових газів, зменшенні залежності від викопних енергоносіїв та підвищенні енергетичної безпеки. Окрему увагу приділено аналізу структури паливних сумішей, впливу біоетанолу на роботу двигунів внутрішнього згорання та оцінці потенціалу біопалива у глобальному енергетичному балансі. Водночас, як зазначено в [2], [3], інформація щодо матеріальних балансів і досягнутих виходів продукції подається переважно без детального розгляду енергоефективності та динамічних властивостей технологічних процесів.

Значний науковий інтерес спрямований на дослідження альтернативної

сировини для виробництва етанолу. У роботах [4], [5] розглядається можливість отримання біопалива з деревини, а в [6], [7] – процеси переробки деревної біомаси з використанням внутрішніх рециркуляцій, що сприяє зниженню енергетичних витрат технологічних схем. Такі підходи демонструють ефективність оптимізації потоків речовини та енергії, а також удосконалення систем рекуперації, проте здебільшого базуються на статичних або квазістаціонарних режимах без урахування динаміки керування технологічними процесами.

Окремий напрямок досліджень пов'язаний із застосуванням методів оптимального та робастного керування в задачах моделювання технологічних систем. У працях [9], [10] представлено методологію побудови моделей у просторі станів та синтезу оптимальних регуляторів, що враховують динамічні властивості об'єкта керування та забезпечують задані показники якості перехідних процесів. Роботи [13], [14] підтверджують ефективність таких підходів при керуванні складними технологічними об'єктами, однак їх результати практично не застосовуються до стадії приготування замісу у виробництві етанолу.

Проведений аналіз свідчить, що, попри значну кількість досліджень, присвячених екологічним аспектам використання біоетанолу, альтернативній сировині та енергоефективності виробництва, питання розроблення динамічних моделей і оптимальних робастних стратегій керування саме процесом приготування замісу, як ключовим етапом зернового етанольного виробництва, залишаються недостатньо опрацьованими.

Аналіз технологічного процесу приготування замісу показав, що густина та в'язкість є параметрами, тісно пов'язаними з концентрацією крохмалю під час термічної обробки, та можуть використовуватися як інформативні показники якості замісу. Експериментальні дані підтверджують залежність між зазначеними параметрами, що відкриває можливість побудови автоматизованої системи контролю на їх основі.

Недостатній рівень автоматизації процесу, значні коливання технологічних параметрів та вплив збурень зумовлюють необхідність удосконалення систем керування початковими стадіями виробництва спирту. Для підвищення ефективності виробництва доцільним є створення комплексної автоматизованої системи керування, здатної забезпечити стабільність параметрів замісу, зниження енергоспоживання та покращення якості кінцевого продукту.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою статті є підвищення ефективності процесу приготування замісу у виробництві етилового спирту шляхом створення динамічної моделі процесу та формування принципів побудови автоматизованої системи керування. Особлива увага приділена моделюванню взаємодії технологічних параметрів у нестационарних умовах, що дозволяє врахувати нелінійну динаміку процесу та вплив збурень.

У статті пропонується розробити математичне представлення процесу у просторі станів, яке забезпечить прогнозування поведінки об'єкта керування

та синтез оптимальних алгоритмів регулювання. Запропонований підхід спрямований на стабілізацію технологічного режиму, зниження енергетичних витрат та забезпечення необхідних показників якості напівпродукту.

Досягнення поставленої мети створює підґрунтя для впровадження високоєфективних автоматизованих систем керування початковими стадіями виробництва етанолу та підвищення конкурентоспроможності підприємств спиртової галузі.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕННЯ

Процес приготування замісу є початковою та однією з визначальних стадій зернового виробництва етилового спирту, оскільки саме на цьому етапі формується вихідна структура та концентраційний склад суміші, що впливають на ефективність подальшого гідролізу та зброджування. Процес змішування зерна з водою та ферментами визначає концентрацію крохмалю в суслі, яка є ключовим показником якості подальших технологічних перетворень та виходу готового продукту [18].

Основним завданням системи керування на даному етапі є підтримання необхідного співвідношення вхідних компонентів та стабільності технологічних параметрів, зокрема витрати зерна, ферменту, води та температури. Традиційні системи автоматичного керування передбачають регулювання витрат зернової суміші та води з використанням трьох контурів керування: витрати зерна, рідкої фази та концентрації замісу. Такі схеми забезпечують базовий контроль, однак залишаються чутливими до змін властивостей сировини та нестабільності вхідних потоків, що призводить до коливань вихідних параметрів.

Сучасні підходи до керування пропонують удосконалення шляхом розрахункового визначення концентрації та застосування нелінійних законів регулювання подачі води, що підвищує точність підтримання параметрів процесу. Водночас ключовою проблемою більшості існуючих систем залишається відсутність контролю за в'язкістю замісу, яка зростає зі збільшенням концентрації сухих речовин. Це ускладнює транспортування суміші, знижує ефективність гідролізу та негативно впливає на вихід спирту, а також обмежує можливість застосування енергозберігаючих режимів роботи.

Таким чином, актуальним є впровадження систем керування, заснованих на динамічних моделях процесу, які описують зміну об'єму та концентрації в часі, враховують нелінійність і вплив збурень. Використання PID-регуляторів та оптимального LQR-регулювання відкриває можливості для підвищення стабільності технологічного процесу, енергоефективності та покращення якості замісу і кінцевого етанольного продукту.

Для розробки системи автоматичного керування процесом приготування замісу взято за основу загальну модель змішування двох потоків зі сталими концентраціями у резервуарі з перемішуванням. Така модель широко використовується для опису масообмінних процесів у хімічній та харчовій промисловості, однак у даній роботі вона адаптована до особливостей спиртового виробництва, де на перебіг процесу суттєво впливають ферментативні реакції, зміна реологічних властивостей сировини (ступінь

подрібнення, вид зерна та вологість) та коливання концентрації сухих речовин.

Для досягнення поставленої мети було сформовано узагальнену математичну модель процесу приготування замісу із зернової сировини та його водно-теплової обробки, що розглядається як комплексний масообмінний процес змішування з тепловим впливом. Цей етап виробництва є критичним, оскільки саме в процесі змішування формується початкова концентрація крохмалю в суслі, рівномірність розподілу ферментів та реологічні властивості середовища, які визначають ефективність ферментативної деструкції та подальшого спиртового бродіння. Виробничі спостереження на спиртових заводах України показали, що нестабільність параметрів замісу призводить до зниження виходу етанолу, збільшення енерговитрат та появи залишкових запасів сусла у технологічній системі.

Технологічний об'єкт являє собою змішувач безперервної дії, у який подаються два основні потоки: вода з ферментним препаратом та подрібнена зернова маса. Вміст змішувача інтенсивно перемішується, що забезпечує однорідність суміші та дає можливість застосувати припущення про рівність концентрації вихідного потоку концентрації суміші в ємності. Такий підхід широко використовується у хімічній і харчовій промисловості під час моделювання безперервних реакторів та змішувальних апаратів, що дозволяє адекватно описати зміну концентрації розчинених компонентів у часі.

Динаміка зміни об'єму замісу визначається рівнянням матеріального балансу, формула 1, 2 [15,18]:

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

де $F_1(t)$ – витрата води з ферментом,

$F_2(t)$ – витрата зернової маси,

$F(t)$ – загальна витрата готового.

Матеріальний баланс концентрації описується співвідношенням:

$$\frac{d}{dt} [c(t)V(t)] = c_1 F_1(t) + c_2 F_2(t) - c(t)F(t), \quad (2)$$

де c_1 і c_2 – концентрації сухих речовин у вхідних потоках,

$c(t)$ – концентрація крохмалю в замісі.

У стаціонарному режимі система задовольняє співвідношенням, формула 3, 4:

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

$$0 = c_1 F_{10} + c_2 F_{20} - c_0 F_0, \quad (4)$$

що дозволяє визначити рівноважні значення параметрів та встановити робочу точку технологічного процесу. На основі виробничих даних спиртових заводів було встановлено, що саме коливання витрат F_1 та F_2 , а також зміна концентрації в зерновій масі є основними причинами нестабільності процесу.

Для подальшого аналізу виконано лінеаризацію моделі відносно стаціонарної точки, що дало змогу перейти до опису у просторі станів, формула 5:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \quad (5)$$

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

Змінні стану ξ_1 і ξ_2 описують відповідно відхилення об'єму та концентрації замісу, а керуючі дії μ_1 і μ_2 визначаються зміною витрат вхідних потоків. Аналіз характеристик отриманої моделі показав, що система є асимптотично стійкою, а перехідні процеси мають експоненційний характер, що підтверджує можливість застосування оптимальних методів керування на її основі.

Подальший аналіз отриманої моделі показав, що динаміка процесу приготування замісу є чутливою до зміни витрат вхідних потоків, що зумовлює необхідність побудови системи автоматичного регулювання, здатної забезпечити стабільність параметрів у широкому діапазоні режимів роботи. Традиційні системи керування, застосовувані на спиртових заводах, переважно реалізують регулювання витрати води за сигналом концентрації суміші, що забезпечує базовий рівень стабільності, проте не враховує взаємозв'язки між каналами керування та їх вплив на динаміку процесу. У результаті в реальних умовах спостерігаються значні перерегулювання, коливання концентрації та об'єму, а також підвищені енерговитрати через надмірне використання сировини.

Для дослідження динаміки системи управління було розглянуто використання класичного регулятора ПІД-регулятора, що є найпоширенішим типом регуляторів теорії автоматичного керування і у промислових системах завдяки простоті налаштування та реалізації. Моделювання системи із застосуванням ПІД-регуляторів виконано в середовищі MATLAB/Simulink з використанням структурної схеми, що передбачає регулювання об'єму та концентрації замісу окремими каналами.

Для перевірки ефективності системи автоматичного керування було проведено моделювання на основі реальних виробничих даних спиртових заводів. На основі отриманих параметрів сформовано математичну модель процесу змішування для різних об'ємів замісу (1; 1,3 м³) та концентрацій розчиненого крохмалю (1,04; 1,09 г/см³), рисунок 1

Для налаштування регуляторів розглянуто кілька класичних підходів теорії автоматичного керування та отримано відповідні перехідні характеристики, що подані на рисунку 2.

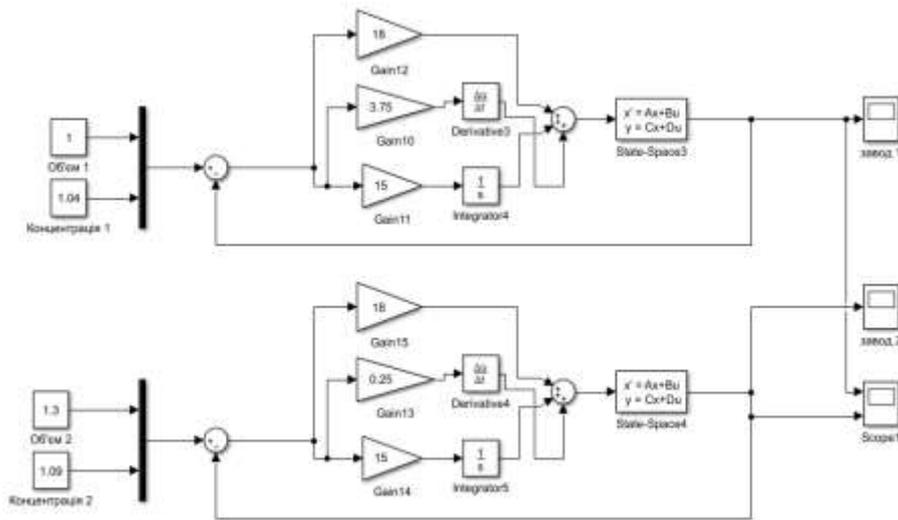


Рисунок 1 – Модель реалізації системи керування з ПІД-регуляторами

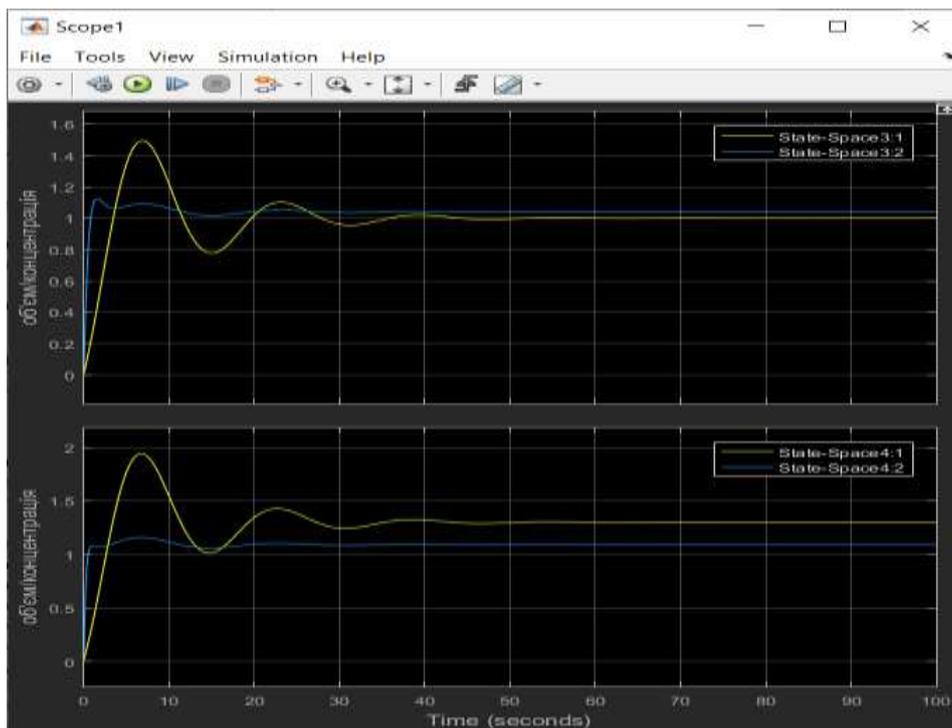


Рисунок 2 – Перехідні характеристики налаштувань ПІД-регулятора

Аналіз результатів моделювання та експериментів засвідчив, що використання ПІД-регуляторів у багатоканальній системі зі взаємопов'язаними контурами призводить до значних перерегулювань (до 15-20 %), збільшення часу встановлення та нестійкої роботи контуру керування. Взаємний вплив витрат води та зернової маси формує неузгоджені керуючі дії, унаслідок чого спостерігаються коливання концентрації та об'єму навіть за незначних

збурень вхідних потоків. Це негативно позначається на перебігу ферментативної обробки, ускладнює транспортування замісу та підвищує ризик мікробного забруднення, що підтверджено виробничими спостереженнями.

Отже, застосування класичних ПІД-регуляторів не забезпечує необхідного рівня якості регулювання та енергоефективності процесу приготування замісу, що обумовлює потребу у впровадженні більш ефективних методів керування. У зв'язку з цим запропоновано використання оптимального LQR-регулятора, який формує закон керування на основі динамічної моделі об'єкта та дозволяє враховувати взаємозв'язки між технологічними параметрами.

Проведені виробничі дослідження показали, що використання LQR-регулятора забезпечує більш ефективне управління процесом приготування замісу порівняно з ПІД-регуляцією. Основною перевагою є те, що регулятор формує керуючі впливи з урахуванням одночасних змін об'єму замісу та концентрації крохмалю, тобто враховує взаємозв'язок між каналами керування.

LQR-регулятор побудовано на основі лінеаризованої моделі у просторі станів, що дозволяє описати поведінку системи поблизу робочої точки. Для цього змінні моделі подано у вигляді відхилень від номінальних значень, формула 6:

$$x(t) = \bar{x} + y, \quad u = \bar{u} + v. \quad (6)$$

Це дає можливість перетворити систему до виду з нульовим рівнем рівноваги. Далі формується закон керування, формула 7:

$$u = \bar{u} - K(x - \bar{x}), \quad (7)$$

де K – матриця коефіцієнтів, яка визначається так, щоб мінімізувати функціонал якості, формула 8:

$$J = \int_0^{\infty} \left[(x - \bar{x})^T Q (x - \bar{x}) + (u - \bar{u})^T R (u - \bar{u}) \right] dt, \quad (8)$$

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.

Важливим етапом синтезу LQR-регулятора є вибір вагових матриць Q та R , які формують функціонал якості J і визначають співвідношення між точністю регулювання та витратами керування. Матриця Q задає пріоритет стабілізації станів системи (об'єму замісу та концентрації крохмалю), тоді як матриця R характеризує «вартість» керуючих дій, обмежуючи надмірні зміни витрат вхідних потоків. Таким чином, збільшення ваг у Q підвищує точність

регулювання, а зростання коефіцієнтів у R забезпечує економність роботи системи.

Для налаштування параметрів LQR-регулятора було проведено моделювання процесу керування приготуванням замісу та його водно-теплової обробки за різних початкових умов і варіантів вагових матриць Q та R. Розглядалися два підходи до їх формування: використання одиничних матриць та налаштування за методом Брісонса [12]. У моделі задавалися характерні технологічні параметри процесу змішування: об'єм замісу 1 м^3 та концентрація розчиненого крохмалю $1,045 \text{ г/см}^3$.

Розрахунок матриці зворотного зв'язку здійснювався в середовищі MATLAB, що дозволило отримати перехідні характеристики системи (рис. 3). Аналіз результатів показав, що класичні налаштування LQR-регулятора забезпечують час регулювання близько 20 с, що є більшим за технологічно допустимий діапазон 2-5 с та супроводжується незначним перерегулюванням. Застосування методу Брісонса дало змогу отримати більш плавний перехідний процес, проте вихід системи на задані значення залишився повільним. Це свідчить про необхідність уточнення вагових коефіцієнтів регулятора для досягнення оптимальних показників керування [17].

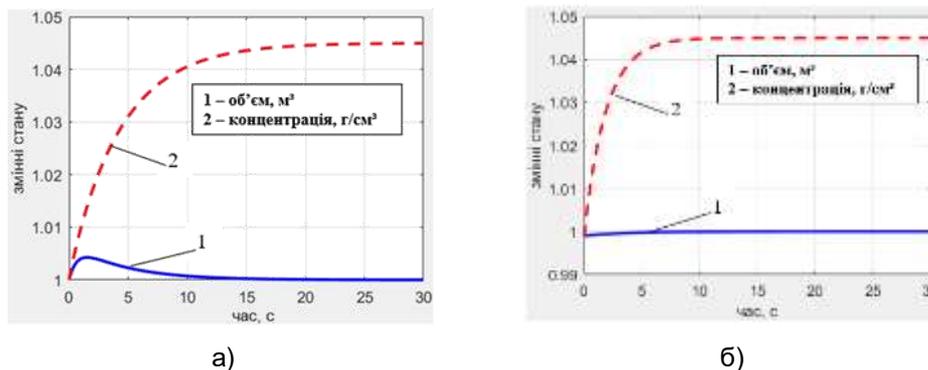


Рисунок 3 – Перехідні характеристики регулювання об'єму та концентрації за класичною методикою (а) і за методом Брісонса (б)

Після етапу параметричного налаштування LQR-регулятора було здійснено його апробацію безпосередньо на виробничих майданчиках українських спиртових підприємств. До досліджень було залучено технологічні лінії Луцького та Марилівського спиртових заводів, для яких попередньо зібрано достовірні експлуатаційні дані щодо витрат сировини, концентрацій та об'ємів замісу. На основі цих даних сформовано параметри математичної моделі [17].

Випробування проводилися в реальному технологічному процесі із подальшим аналізом у середовищі MATLAB. Отримані результати моделювання показали, що застосований LQR-регулятор забезпечує швидке встановлення потрібних значень об'єму та концентрації без коливань і перевищення встановлених режимних параметрів. Графічні залежності (рис. 4) демонструють плавний характер перехідних процесів, що підтверджується

розрахованими матрицями зворотного зв'язку К для різних комбінацій вагових коефіцієнтів Q та R [15-17].

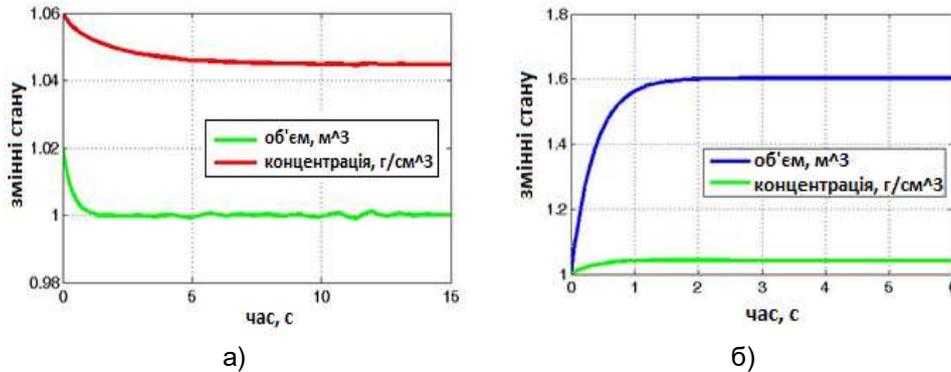


Рисунок 4 – Процес регулювання об'єму та концентрації крохмалю в замесі під час налаштування регулятора

Подальший порівняльний аналіз показав, що ключовим фактором якості керування є забезпечення стабільності об'єму в чанку. Навіть незначні відхилення цього параметра здатні спричинити осідання та налипання продукту на стінках обладнання, порушення транспортування суслу та збільшення мікробіологічних ризиків. Коливання ж концентрації переважно впливають на вихід готового спирту та ефективність подальших стадій переробки.

З огляду на це, під час коригування матриці Q було підвищено вагу стабілізації об'єму порівняно з концентрацією. Такий підхід забезпечив значно кращі динамічні показники: час регулювання зменшився до 0,5–5 с, при цьому перехідні процеси відбувалися без перевищення та коливань (рис. 5). Розраховані коефіцієнти зворотного зв'язку гарантували точне досягнення цільових параметрів навіть за умов змін навантаження та зовнішніх збурень [16].

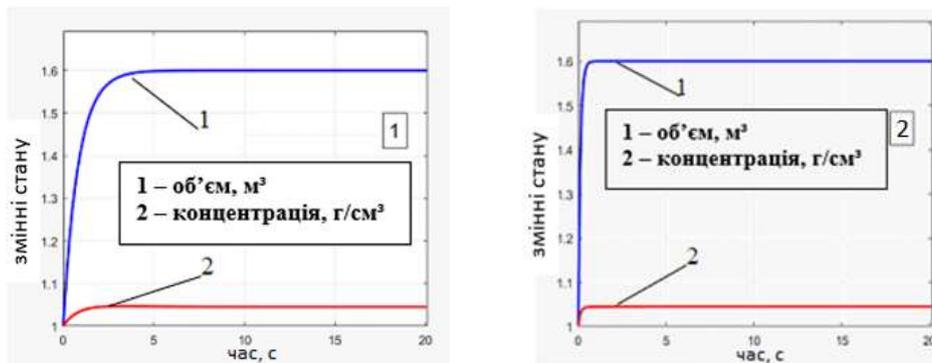


Рисунок 5 – Процес регулювання об'єму та концентрації крохмалю в замесі за умови врахування пріоритетності параметрів

Додатково слід відзначити, що налаштування матриць Q та R фактично реалізовувало модальний підхід до синтезу регулятора. Кожна зміна їхніх параметрів впливала на розміщення полюсів замкненої системи в комплексній площині, що дозволяло непрямим чином здійснювати модальне керування динамікою процесу.

Зменшення елементів матриці R та підвищення ваг у Q зміщували полюси системи лівіше, забезпечуючи швидке згасання режимів та скорочення часу перехідного процесу. Натомість збалансовані значення ваг переміщували полюси ближче до уявної осі, що формувало більш плавну і згладжену динаміку.

Проведені дослідження підтвердили, що варіювання вагових матриць дозволяє не лише отримати необхідні перехідні характеристики для конкретних виробничих умов, але й сформувати стійку модально керовану структуру системи з урахуванням технологічних особливостей процесу [15].

Таким чином, результати промислових випробувань підтвердили доцільність застосування оптимального LQR-регулювання для автоматизації стадії приготування замісу. Запропонований підхід дозволив підвищити стабільність технологічного процесу, покращити керованість і створив передумови для впровадження енергоощадних режимів у виробництві спирту.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Результати моделювання та промислових випробувань показали, що застосування LQR-регулятора забезпечує значно кращу якість керування порівняно з ПІД-регуляторами. Час встановлення параметрів скоротився до 0,5-5 с, усунені коливання та перерегулювання, а система зберігає стабільність навіть за наявності збурень у витратах та концентрації. Надання пріоритету стабілізації об'єму замісу дозволило уникнути технологічних проблем, таких як налипання та нерівномірне перемішування, що було підтверджено виробничими випробуваннями на підприємствах.

ВИСНОВКИ

У роботі розроблено та досліджено систему автоматичного керування процесом приготування зернового замісу на основі динамічної моделі у просторі станів. Показано, що традиційні PID-регулятори не забезпечують необхідної якості керування через взаємозв'язок каналів, що призводить до перерегулювань, коливань параметрів та підвищених енергетичних витрат.

Запропоноване застосування оптимального LQR-регулятора дало змогу значно покращити динаміку процесу: час встановлення зменшено до 0,5–5 с, усунуто коливання та перерегулювання, забезпечено точне підтримання об'єму та концентрації замісу за наявності технологічних збурень. Оптимізація вагових матриць дозволила врахувати пріоритетність стабілізації об'єму, що є критичним для безперервності виробництва.

Результати моделювання та виробничих випробувань на спиртових підприємствах підтвердили ефективність запропонованого підходу та можливість його практичного впровадження. Використання оптимального керування забезпечує підвищення стабільності технологічного процесу, зменшення енергоспоживання та покращення якості кінцевого продукту.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] C. A. Cardona Alzate, O. J. Sánchez Toro, Energy consumption analysis of integrated flowsheets for production of fuel ethanol from lignocellulosic biomass, *Energy*, Volume 31, Issue 13, 2006, Pages 2447-2459, ISSN 0360-5442.
- [2] C. Tengborg et al. Reduced inhibition of enzymatic hydrolysis of steam-pretreated softwood *Enzyme Microb Technol* (2001) D. Gregg et al. Bioconversion of lignocellulosic residue to ethanol: process flowsheet development. *Biomass Bioenergy* (1995)
- [3] D. Gregg et al. Techno-economic evaluation of a generic wood-to-ethanol process: effect of increased cellulose yields and enzyme recycle. *Bioresource Technol.* (1998)
- [4] M. von Sivers et al. A techno-economical comparison of three processes for the production of ethanol from pine. *Bioresource Technol.* (1995)
- [5] M. Galbe et al. Simulation of ethanol production processes based on enzymatic hydrolysis of woody biomass. *Comput. Chem. Eng.* (1994)
- [6] R. P. Tengerdy et al. Bioconversion of lignocellulose in solid substrate fermentation. *Biochem. Eng. J.* (2003)
- [7] L. Olsson et al. Fermentation of lignocellulosic hydrolysates for ethanol production. *Enzyme Microb. Technol.* (1996).
- [8] J.R. Moreira Sugarcane for energy-recent results and progress in Brazil *Energy. Sust. Dev.* (2000).
- [9] Kuzmych, O., Hajjaji, A., Aitouche, A., Bosche, J. and Telmoudi, A. (2017). Sum of squares based nonlinear control design. application to biodiesel engine., *IEEE Conference Publications: 2015 4th International Conference on Systems and Control (ICSC), Hammamet, Tunisia; IEEE Xplore Digital Library. DOI: 10.1109/CoDIT.2017.8102564.*
- [10] Brian, D., Anderson, O. and Moore, J. (1989). *Optimal Control. Linear Quadratic Methods.*, Department of Systems Engineering, Australian National University, Canberra, Prentice-Hall International, Inc., ISBN 0-13 -638651-2.
- [11] Wongsurakul, P.; Termtanun, M.; Kiatkittipong, W.; Lim, J.W.; Kiatkittipong, K.; Pavasant, P.; Kumakiri, I.; Assabumrungrat, S. Comprehensive Review on Potential Contamination in Fuel Ethanol Production with Proposed Specific Guideline Criteria. *Energies* 2022, 5, 2986. <https://doi.org/10.3390/en15092986>
- [12] Chen Chi Tsong. *Linear System Theory and Design : 3 тє вид. : Oxford Univ. Press, 1998. 352 p.*
- [13] Christensen, E.; Fioroni, G.M.; Kim, S.; Fouts, L.; Gjersing, E.; Paton, R.S.; McCormick, R.L. Experimental and theoretical study Of oxidative stability of alkylated furans used as gasoline blend components. *Fuel* 2018, 212, 576–585. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.10.066>.
- [14] Haaz, E.; Fozer, D.; Toth, A.J. Development of Anhydrous Ethanol Purification: Reduction of Acetal Content and Vapor–Liquid Equilibrium Study of the Ethanol–Acetal Binary System. *ACS Omega* 2021, 6, 1289–1298. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c04750>.
- [15] 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
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.

MODELING AND OPTIMAL CONTROL OF THE ETHANOL PRODUCTION PROCESS USING THE SPATIAL STATE APPROACH

Markina, L. Senior Lecturer
Satsyk, V. PhD, Associate Professor
Lutsk National Technical University / Ukraine

Abstract. This paper considers the process of preparing a mixture that can be used to optimize the production of food and fuel ethanol. An automatic system for optimal control of the mixture preparation process has been developed, based on measuring the consumption of raw materials and the concentration of the mixture, as well as regulating the water supply. The proposed controller maintains the required mixture level by changing the flow rates. By changing the flow rates of the components, the optimal controller maintains a constant mixture concentration and stabilizes the flows. The developed improved optimal controller is based on robust control of a nonlinear process, which ensures more stable system operation, improved quality of the mash and the final ethanol product, smooth transitions between modes, and energy savings.

Keywords: optimal control, dynamic modeling, ethanol production, state space system.

Дата першого надходження статті до видання	Дата прийняття статті до друку статті після рецензування	Дата оприлюднення
07.10.2025 р.	25.10.2025 р.	23.12.2025 р.