

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет автоматизації, промислової інженерії та екології
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра технічних та програмних засобів автоматизації
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ Віталій ЦАПАР
«_____» _____ 20____

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

**за освітньо-професійною програмою «Технічні та програмні засоби
автоматизації»**

**зі спеціальності 174 – Автоматизація , комп'ютерно-інтегровані технології
та робототехніка**
(код і назва)

**на тему: Автоматизація керуванням процесом змішування карбамідних
олігомерів з використанням робастного регулятора**

Виконав : студент 2__ курсу, групи _ЛК-42мп_
(шифр групи)

Аршаний Артем Ігорович _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник доцент, к.т.н, доцент Бугаєва Людмила Миколаївна _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові)

Консультант _____
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ім'я, по батькові)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних посилань.
Студент _____

Київ – 2025 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет автоматизації, промислової інженерії та екології
(повна назва)

Кафедра технічних та програмних засобів автоматизації
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка

Освітньо-професійна програма «Технічні та програмні засоби автоматизації»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ Віталій ЦАПАР

«__» _____ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту**

Аршаному Артему Ігоровичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Автоматизація керуванням процесом змішування
карбамідних олігомерів з використанням робастного регулятора _____

_____ ,

науковий керівник дисертації Бугаєва Людмила Миколаївна к.т.н., с.н.с.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт дослідження технологічний процес змішування у виробництві
карбамідних олігомерів, зокрема система, що регулює кислотність. 4. Вихідні
дані схема виробництва карбамідних олігомерів, дані змішувача, діапазони
зміни витрат карбаміду, формаліну та їдкого натру, експериментальні дані
залежності рН від витрати їдкого натру

5. Перелік завдань, які потрібно розробити

Описати технологічний процес виробництва карбамідних олігомерів та роль змішувача у загальній схемі. Розробити математичну модель змішувача з урахуванням динаміки рН та типових збурень. Виконати синтез оптимального регулятора LQR та PID-регулятора для керування кислотністю. Розробити робастний регулятор. Провести моделювання для кількох сценаріїв роботи змішувача, порівняти ефективність усіх регуляторів

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу

Схема процесу виробництва карбамідного олігомера, Схема оптимального керування змішування, математична модель, графіки моделювання регуляторів в змішувачі, програмний модуль розрахунку математичної моделі

7. Консультанти розділів дисертації**

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання 1 вересня 2025 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз процесу виробництва карбамідних олігомерів та опис технологічної схеми	01.09 - 18.09	
2	Постановка задачі автоматизації процесу	19.09 - 29.09	
3	Розробка математичної моделі змішувача	30.10 - 14.11	
4	Розробка оптимального керування	15.11 - 26.11	
5	Розробка класичного PID-регулятора	27.11 - 02.12	
6	Дослідження та розробка робастного керування	03.12 - 18.12	
7	Тестування усіх регуляторів за сценаріями, порівняння результатів	19.12 - 01.01	
8	Розробка стартап-проекту	02.01-05.01	
8	Оформлення пояснювальної записки, виконання ілюстративних матеріалів (презентації)	06.01 - 10.01	

Студент
Науковий керівник дисертації

Аршаний Артем Ігорович
Бугаєва Людмила Миколаївна

Реферат

Магістерська робота на тему *"Автоматизація керуванням процесом змішування карбамідних олігомерів з використанням робастного регулятора"* містить пояснювальну записку об'ємом 95 сторінок. Пояснювальна записка містить 12 рисунків, 4 додатки і 18 літературних джерел. В розділах пояснювальної записки виконаний опис та аналіз технологічного процесу; представлена функціональна схема автоматизації процесу, за експериментальними даними створено та досліджено математичну модель об'єкта керування, створено систему керування процесом виробництва карбамідних олігомерів на основі синтезу робастного регулятора, представлено порівняння результатів роботи системи з класичним оптимальним регулятором та PID-регулятором. В результаті отримана математична модель, котра дозволяє будувати на її основі системи керування реального часу, що неможливо зробити на основі початкових складних математичних моделей у зв'язку з тим, що розрахунок останніх вимагає значного часу. Розроблено систему керування процесом змішування на основі синтезованого робастного регулятора, яка дозволяє досягати бажаних характеристик керованої змінної навіть при зміні параметрів об'єкта.

Ключові слова: автоматичне керування, змішувач, рН-регулювання, PID-регулятор, оптимальний регулятор, робастне керування.

Abstract

The master's thesis on the topic "Automation of control of the urea oligomer mixing process using a robust controller" contains an explanatory note of 95 pages. The explanatory note includes 12 figures, 4 annexes, and 18 literary sources. The sections of the explanatory note provide a description and analysis of the technological process; a functional scheme of process automation is presented; based on experimental data, a mathematical model of the control object was created and studied; a control system for the production process of urea oligomers was developed based on the synthesis of a robust controller; a comparison of the system's performance with a classical optimal and PID regulator is provided. As a result, a mathematical model was obtained that allows the development of real-time control systems based on it, which is not feasible using the original complex mathematical models due to the significant time required for their computation. A control system for the mixing process was developed based on the synthesized robust controller, which allows achieving the desired characteristics of the controlled variable even when the parameters of the object change.

Keywords: automatic control, mixer, pH regulation, PID controller, optimal regulator, LQR, robust control.

ЗМІСТ	стор
ВСТУП.....	8
1. ПРОЦЕС ВИРОБНИЦТВА КАРБАМІДНИХ ОЛІГОМЕРІВ	12
1.1.Опис технологічного процесу виробництва карбамідних олігомерів.....	12
1.2 Аналіз основних параметрів виробництва карбамідних олігомерів..	16
1.3 Постановка задачі розробки системи автоматизації процесу та дослідження та аналіз об'єкта автоматичного керування	17
ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ.....	21
2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗМІШУВАЧА.....	22
2.1 Побудова мат моделі та статичної характеристики	22
2.2 Побудова динамічної характеристики	24
2.3 Перехідна характеристика системи	26
3. ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ.....	28
3.1 Ведення необхідних умов оптимальності	28
3.2 Розрахунок оптимального програмного керування	29
3.3 Синтез оптимального регулятора типу LQR	32
3.4 Синтез класичного PID-регулятора	34
4. РОБАСТНЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ЗМІШУВАННЯ	40
4.1 Теоретичні основи робастного керування	40
4.2 Математична модель системи робастного керування	41
4.3 Постановка задачі синтезу	43
4.4 Вихідні дані та сценарії моделювання.....	44

4.5 Створення моделі та реалізація.....	46
4.6 Тестування моделі та робастного регулятора за сценаріями в MATLAB.....	48
5. ПОРІВНЯННЯ ОПТИМАЛЬНОГО LQR, PID ТА РОБАСТНОГО РЕГУЛЯТОРІВ.....	61
5.1 Порівняння за п'ятьма сценаріями моделювання LQR, PID та робастного регуляторів	61
6. СТАРТАП ПРОЄКТ	7Помилка! Закладку не визначено.
6.1 Опис стартап проєкту	7Помилка! Закладку не визначено.
6.2 Конкурентний аналіз	78
6.3 Аналіз динаміки ринку	79
6.4 Ситуаційний аналіз факторів макромаркетингового середовища.....	80
6.5 SWOT-Аналіз	81
ВИСНОВКИ.....	84
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	86
Додаток А Схема оптимального керування змішування у виробництві карбамідних олігомерів	88
Додаток Б. Код програмної реалізації повільної моделі	89
Додаток В. Код програмної реалізації моделювання зовнішнього збурення на систему	91
Додаток Г. Код програмної реалізації ступінчастої зміни завдання.....	94

Список скорочень

LQR - Linear Quadratic Regulator - лінійно-квадратичний регулятор.

PID - Proportional–Integral–Derivative - пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор.

MATLAB -Matrix Laboratory (інтерактивне середовище для наукових та інженерних розрахунків).

pH - Potential of Hydrogen - водневий показник (вимірює кислотність).

САК - Automatic Control System - система автоматичного керування.

МФ-17 - Марка сечовино-формальдегідної (карбамідної) смоли.

C - Концентрація речовини.

F - Коефіцієнт зворотного зв'язку робастного регулятора (або витрата, залежно від контексту).

K - Gain - Коефіцієнт підсилення.

Q - Flow rate - Об'ємна витрата.

T - Time constant - Постійна часу .

$u(t)$ - Control input - Керуючий вплив.

V - Volume - Об'єм.

$x(t)$ - State vector - Вектор стану.

$y(t)$ - Output variable - Вихідна змінна.

ВСТУП

Процес виробництва карбамідних олігомерів є складним і багатостадійним, що робить його важливим об'єктом для дослідження та вдосконалення із допомогою автоматизованих систем керування. У сучасних умовах промисловість ставить підвищені вимоги до стабільності, безпеки виробництва та якості продукції, тому ефективне регулювання основних параметрів процесу, таких як кислотність, температура або тиск, набуває особливого значення. Порушення режиму або неадекватна реакція системи на збурення можуть призводити до відхилень у властивостях кінцевого продукту, зниження продуктивності або навіть до аварійних ситуацій, що впливають на обладнання та безперервність виробництва. Зокрема, об'єктом даного дослідження є процес змішування, який відіграє важливу роль у формуванні вихідних характеристик продукту. Саме в цій ланці виробництва виникає потреба в точному та швидкому регулюванні кислотності, що забезпечує відповідність продукції технологічним вимогам. У разі відсутності надійної системи автоматичного керування змішувач може стати джерелом значних коливань параметрів, що вимагає постійного втручання оператора та ускладнює підтримання стабільності.

Метою магістерської роботи є розробка та дослідження системи автоматизованого керування, що забезпечує стабілізацію кислотності у процесі змішування карбамідних олігомерів за допомогою робастного регулятора. Для досягнення цієї мети необхідно проаналізувати об'єкт регулювання, побудувати математичну модель, синтезувати різні типи регуляторів, здійснити моделювання та провести порівняльний аналіз отриманих результатів.

Предметом дослідження є методи та алгоритми керування, які забезпечують стійку роботу об'єкта в умовах змін параметрів і збурень.

Об'єктом дослідження виступає технологічний процес змішування у виробництві карбамідних олігомерів, зокрема система, що регулює кислотність. Система автоматизованого регулювання повинна не лише підтримувати задані умови, а й мати здатність адаптуватися до змін, бути стійкою до зовнішніх та внутрішніх впливів, а також забезпечувати точність і надійність навіть за умови неповної або нечіткої інформації про об'єкт. З огляду на це, в рамках дослідження розглянуто підхід до створення регулятора, здатного працювати в умовах невизначеності та варіативності параметрів, так званого робастного регулятора. Його побудова дозволяє врахувати широкий діапазон можливих змін у динаміці об'єкта та забезпечити стійке функціонування системи навіть за складних умов експлуатації.

У роботі застосовано методи математичного моделювання, імітаційного аналізу, порівняння динамічних характеристик системи з різними законами регулювання. За допомогою цих методів було побудовано кілька варіантів регуляторів і здійснено оцінку ефективності керування за показниками перехідних процесів. Використання програмного забезпечення для моделювання, зокрема середовища MATLAB, надає широкі можливості для візуального аналізу поведінки системи, перевірки різних варіантів регуляторів, тестування чутливості до збурень тощо.

Практичне значення дослідження полягає в можливості застосування запропонованого підходу для вдосконалення систем автоматичного керування для подібних технологічних об'єктів. Апробація результатів роботи у процесі виконання магістерської дисертації дає можливість перевірити працездатність розроблених алгоритмів та інтерпретувати результати моделювання.

Актуальність теми визначається практичними потребами забезпечення процесу виробництва карбамідних олігомерів гнучкою та надійною системою

керування, що має гарантувати стабільність самого процесу та відповідну якість продукції.

РОЗДІЛ 1. ПРОЦЕС ВИРОБНИЦТВА КАРБАМІДНИХ ОЛІГОМЕРІВ

1.1 Опис технологічного процесу виробництва карбамідних олігомерів

Амінопласти, такі як ізоміл, мелмекс, пласкон, полтопас, сканопал, ультрапас та інші, є пластмасами на основі аміноальдегідних смол, головним чином сечовино- та меламіно-формальдегідних. Розглянемо можливий склад аміноальдегідних полімерів.

Зазвичай вони включають такі наповнювачі як целюлоза, азбест, тальк, деревне борошно, скляне волокно або др, модифікуючі добавки- ді- або триетаноламін, поліаміди, тіосечовину, кремнійорганічні олігомери або полівініловий спирт; змащувальні речовини (до 0,5 % від маси А) -стеарин, стеарати Zn, Mo, Al, гліцерилстеарати; органічні і (або) мінеральні пігменти.

Виробляють амінопласти у вигляді пресматеріалів (порошків, гранул, волокнистих продуктів), пінопластів, шаруватих пластиків (див. карбамідо-формальдегідні пінопласти) [1].

Аміноальдегідні полімери виготовляють шляхом реакції поліконденсації багатофункціональних амінів і формальдегідів. За видами амінового складника розрізняють: мочевино-, меламіно- і мочевиномеламіноформальдегідні полімери. Аміноальдегідні полімери і пластмаси на їх основі займають перше місце у виробництві термореактивних смол.

Прес-порошкові амінопласти містять наповнювачі бавовняний пух, тальк, азбест і широко використовуються для виробництва електроустановочних виробів (ізоляторів, електричних панелей, корпусів вимикачів, штепсельних розеток і вилок), корпусів телефонної апаратури, динамічних гучномовців, галантерейних виробів (гудзиків, банок для сипких

продуктів, шкатулок, горшків для квітів тощо), посуд і кухонне приладдя (тарілки, чашки, ручки для каструль, чайників).

Карбамідні полімери продукти поліконденсації сечовини та її похідних з формальдегідом, до них відносяться сечовиноформальдегідні і меламинаформальдегідні полімери. За своїми властивостями карбамідні полімери мають багато спільного з фенолоформальдегідних. Особливістю карбамідних полімерів є їх безбарвність, світлостійкість, відсутність запаху і менша токсичність [2].

Аміноальдегідні полімери виходять шляхом конденсації амінів (карбаміду, меламіну) з альдегідами (головним чином формальдегідом).

При взаємодії карбаміду з формальдегідом у нейтральному чи лужному середовищі утворюються моно- чи діметилпохідні карбаміду, які при подальшій поліконденсації з карбамідом у водянйім слабокислім середовищі утворюють лінійні олігомери.

Механізм утворення метилольних похідних карбаміду, а також вплив кислотності середовища на напрямки реакцій конденсації детально описані у праці [3], де підкреслюється послідовний перехід від утворення метилольних груп до формування лінійних і сітчастих структур.

Склад олігомера залежить від умов проведення процесу і співвідношення вихідних компонентів. При нагріванні олігомера в присутності кислотних каталізаторів утвориться полімер сітчастої будови (процес твердіння).

У промисловості випускаються карбамідні олігомери різних марок – для прес-порошків, просочувальних матеріалів і клеїв. Промислові методи одержання карбамідних смол визначаються їхнім призначенням. При виробництві пресувальних матеріалів одержують продукти конденсації карбаміду з формальдегідом у вигляді водяного чи розчину емульсії, що потім змішують з наповнювачами і добавками, сушать і подрібнюють.

Схема одержання карбамідного олігомера, модифікованого діетиленгліколем, представлена на рис. 1.1.

Технологічний процес виробництва карбамідної смоли здійснюється за неперервною схемою. У змішувальну ємність 1 завантажують формалін і карбамід. За допомогою відцентрового насоса вміст ємності перемішується до повного розчинення карбаміду у формаліні. Відтак додаванням розчину їдкого натру рН реакційної суміші доводиться до 6,5–7,0.

Реакційна суміш передається відцентровим насосом до збірника конденсаційного розчину 2, звідки самопливом через фільтр 3 неперервно надходить у реактор для конденсації 4. Конусна частина реактора оснащена сорочкою для обігріву. Крім того, всередині апарата є змійовик для додаткового обігріву парою й труба, якою конденсаційний розчин подається на поверхню обігрівного днища апарата. Реактор оснащений холодильником 5, який під час пуску агрегата включається як зворотний, а протягом усього процесу працює як прямий – це забезпечує одночасно з конденсацією також і сушіння одержуваної смоли. При виробництві смоли МФ-17 у реактор 4 через мірник 6 і фільтр 7 неперервно подається діетиленгліколь (у співвідношенні 1:14 до реакційної суміші).

У залежності від швидкості подачі суміші температура маси підтримується в межах 105–115°C. Смола, що утворилася, неперервно виводиться з верхньої частини реактора в апарат 8 на стабілізацію. У стабілізатор з охолодженою до 40 °C смолою при перемішуванні з мірника 9 подається 25 %-на аміачна вода (у співвідношенні 1:3 до смоли, що надходить). Якість смоли в стабілізаторі систематично контролюється за наступними показниками:

- Сухий залишок, %, не менш 70;
- в'язкість (віскозиметр ВЗ-1), з 30–150;
- життєздатність, ч, не більш 7.

Після стабілізації готова смола надходить у збірник 10, звідки зливається в тару.

Карбамідні олігомери сполучають у собі досить високу теплостійкість і добрі діелектричні властивості зі світлостійкістю і здатністю легко забарблюватись у будь-який колір. Карбамідні олігомери всіх типів здатні тверднути на холоді й при нагріванні в присутності органічних кислот, кислих солей чи кислих ефірів.

Відомо, що карбамідні олігомери характеризуються високою діелектричною стійкістю, світлостійкістю та здатністю до забарвлення, що підтверджується також даними, наведеними у [4]. У промислових умовах такі властивості роблять їх придатними для використання у прес-порошках і просочувальних складах.

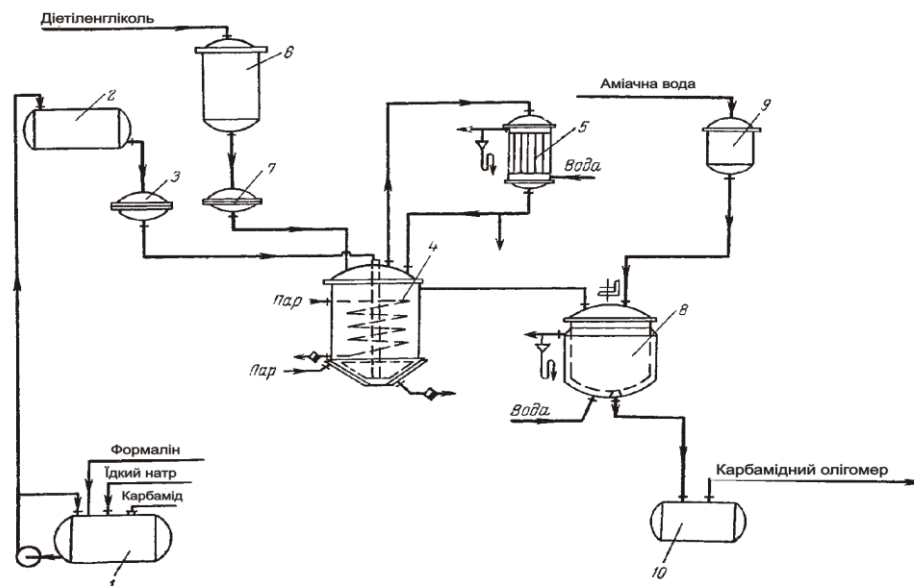


Рисунок 1.1 - Схема процесу виробництва карбамідного олігомера:

1 – змішувач; 2 – збірник конденсаційного розчину; 3, 7 – фільтри; 4 – реактор; 5 – холодильник; 6, 9 – мірники; 8 – апарат для стабілізації; 10 – збірник готового олігомера.

Карбамідні олігомери широко використовуються в якості зв'язувальних у преспорошках, застосовуваних для виготовлення деталей електроарматури та будівельних деталей, у вигляді розчинів для просочення паперу при виробництві декоративного лицювального матеріалу, як клеї для склеювання і просочення деревини та тканин, для проклеювання паперу і картону. На основі карбамідних олігомерів одержують пористий матеріал міпор, що відрізняється високими тепло- та звукоізоляційними показниками [5].

1.2 Аналіз основних параметрів виробництва карбамідних олігомерів

Аналіз технологічного процесу виробництва карбамідних олігомерів показав необхідність розробки на основі сучасних рішень в сфері технічних засобів нової схеми автоматизації для реалізації оптимального режиму роботи обладнання.

Необхідність застосування сучасних методів автоматизації для стабілізації основних параметрів (температури, рівня, рН, витрат) підтверджується дослідженнями в галузі автоматизації хімічних виробництв [6].

В ході роботи було сформовано завдання на керування для кожного технологічного апарату (рис. 1.1):

1. Змішувач 1. Необхідно реалізувати регулювання співвідношення трьох вхідних витрат (назви витрат) та керування оптимальним рівнем в апараті.
2. Збірник конденсаційного розчину 2. Необхідно реалізувати керування рівнем розчину в апараті.

3. Фільтри 3, 7. Необхідно реалізувати регулювання подачі суміші через фільтр.
4. Реактор 4. Необхідно реалізувати підтримку заданої температури у обігрівного днища реактора, здійснювати контроль температури основної частини реактора, контроль кількості подачі пари до обігрівного днища реактора та контроль подачі пари до основної частини.
5. Холодильник 5. Необхідно реалізувати підтримку заданої температури, регулюючи подачу води.
6. Мірник 6. Необхідно реалізувати контроль подачі речовини діетіленгіколь до мірника та підтримувати оптимальний рівень в ньому.
7. Апарат для стабілізації 8. Необхідно реалізувати підтримку заданої температури у апараті, регулюючи подачу води.
8. Мірник 9. Необхідно реалізувати контроль подачі речовини аміачної води до мірника та підтримувати оптимальний рівень в ньому.
9. Збірник готового олігомера 10. Необхідно реалізувати підтримку заданого рівня.

1.3 Постановка задачі розробки системи автоматизації процесу та дослідження та аналіз об'єкта автоматичного керування

Змішувач для синтезу карбаміду є одним з головних компонентів технологічного процесу, що виконує змішування сировинних компонентів: карбаміду, формаліну та їдкого натру. Змішувач виконує функцію підтримання постійної концентрації вихідної суміші та регулювання її кислотності на виході. Основне завдання змішувача - забезпечити сталу кислотність на виході завдяки контролюванню концентрації їдкого натру.

Змішувач має стандартну конструкцію, яка передбачає:

- Три входні патрубки для подачі карбаміду, формаліну та їдкого натру.
- Вихідний патрубок для готової суміші.
- Датчик кислотності (рН), встановлений на виході змішувача, для моніторингу та регулювання процесу.
- Систему керування, яка автоматично регулює подачу їдкого натру залежно від значення рН.

Розглянемо структурно-параметричну схему змішувача.

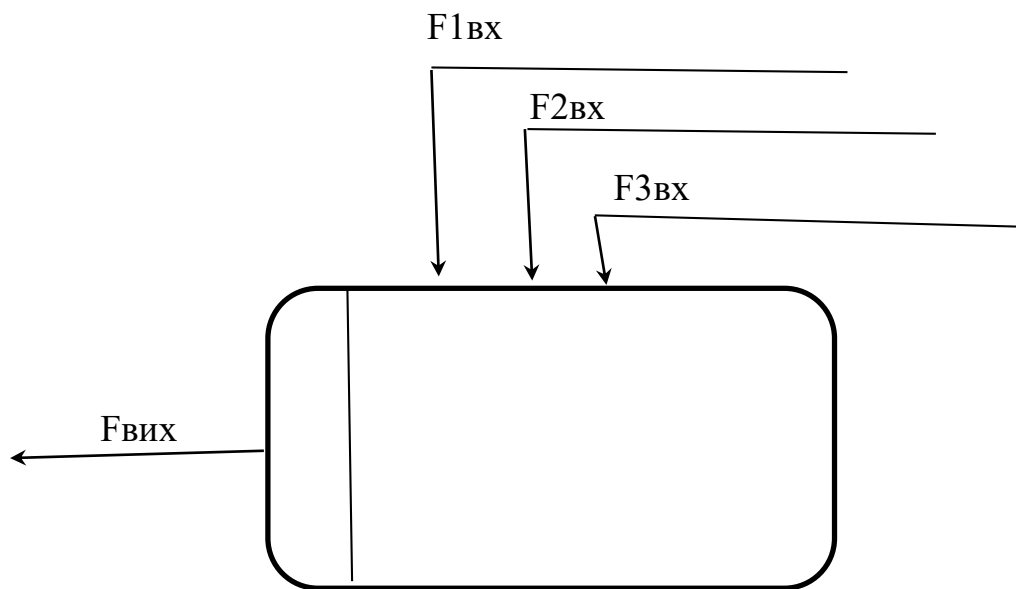


Рисунок 1.2 - Схема змішувача

F1вх – їдкий натр, подається на вхід;

F2вх – формалін, подається на вхід;

F3вх – карбамід, подається на вхід;

Fвих – вихідна реакційна суміш;

Для розробки математичної моделі було взято до уваги, що

- Карбамід та Формалін подаються у систему стало
- Концентрація Їдкого натру може змінюватись

Для сучасних хімічних виробництв висуваються жорсткі вимоги до точності, стабільності та адаптивності систем автоматичного регулювання. Як показав огляд літератури, традиційні підходи до керування не завжди дозволяють досягти необхідної якості перехідних процесів у реальних умовах, де параметри об'єкта можуть змінюватися внаслідок температурних коливань, зношення обладнання чи зміни сировини. Особливо це актуально для процесів змішування реагентів, де ключовим параметром, що впливає на якість кінцевого продукту, є кислотність суміші.

Автоматичне регулювання кислотності є критичним компонентом систем керування на ділянках змішування карбаміду, формаліну та їдкого натру. Своєчасне та точне внесення коригувань подачі реагентів дозволяє не лише покращити якість продукції, але й забезпечити безпечну роботу установки, знизити витрати та підвищити енергоефективність.

Проведений аналіз показав, що класичні регулятори, зокрема PID, залишаються актуальними завдяки своїй простоті та поширеності. Водночас методи оптимального LQR та робастного керування відкривають нові можливості для побудови більш адаптивних і стійких систем. Актуальність дослідження підтверджується також загальною тенденцією переходу до інтелектуальних систем керування, що працюють в умовах невизначеності та нестабільності.

Класичні PID-регулятори залишаються найпоширенішими для хімічних об'єктів, однак сучасні роботи підкреслюють переваги оптимальних та робастних методів керування у випадках змінних параметрів [7].

Таким чином, подальше дослідження зосереджене на порівнянні трьох підходів до керування технологічним процесом змішування - класичного PID, оптимального LQR та робастного регулятора. На основі математичної моделі змішувача та п'яти сценаріїв моделювання аналізуються їхня точність, стійкість та здатність забезпечувати стабільне регулювання рН в умовах реальних виробничих відхилень: зміни витрат реагентів, коливань параметрів об'єкта та дії зовнішніх збурень. Це дозволяє визначити, який тип регулятора є найбільш ефективним для практичної реалізації у виробництві карбамідних олігомерів. Структурна схема системи автоматизації змішувача, що використовується у подальших розділах для побудови математичної моделі та синтезу регуляторів, наведена у Додатку А.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Метою роботи є дослідження, моделювання та порівняння різних підходів до автоматичного регулювання кислотності в хімічному змішувачі, що використовується у виробництві карбамідних олігомерів.

Для досягнення цієї мети необхідно виконати такі завдання:

1. Побудувати математичну модель об'єкта керування - змішувача, з урахуванням динаміки та типових збурень.
2. Реалізувати оптимальне керування на основі програмного сигналу та синтезувати регулятор типу LQR.
3. Розробити класичний PID-регулятор і порівняти його ефективність з LQR.
4. Побудувати робастний регулятор, здатний зберігати стабільність і якість регулювання при зміні параметрів моделі.
5. Провести порівняльне моделювання трьох типів регуляторів у різних сценаріях роботи та оцінити якість перехідних процесів.
6. Розробити стартап-проект для оцінки комерційного потенціалу та економічної доцільності впровадження розробленої системи керування.
7. Зробити узагальнюючі висновки та надати рекомендації щодо практичного використання розглянутих підходів.

Таким чином, робота має на меті не тільки теоретичне дослідження, а й практичну оцінку застосовності сучасних і класичних стратегій керування в умовах невизначеності, характерних для реальних технологічних об'єктів.

РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗМІШУВАЧА

2.1 Побудова мат моделі та статичної характеристики

Для визначення статичної характеристики системи важливо розглянути основні фактори, що впливають на вихідну концентрацію їдкого натру. Змішувач у даній системі виконує функцію інтегратора різних потоків речовин: формаліну, карбаміду та їдкого натру, які надходять із різними концентраціями та швидкостями. Об'єм у змішувачі сталий. Метою є забезпечення сталого вихідного стану, що задовольняє технологічні вимоги процесу.

Розглядаються такі параметри для статичної характеристики як:

$C_{\text{натр,вихід}}$ - концентрація їдкого натру на виході змішувача

C_f, Q_f - концентрація та швидкість подачі формаліну

C_c, Q_c - концентрація та швидкість подачі карбаміду

$C_{\text{натр}}, Q_{\text{натр}}$ - концентрація та швидкість подачі їдкого натру

$C_{\text{вихід}}$ - загальна швидкість потоку на виході змішувача

Використовуючи диференційне рівняння, можна описати зміну концентрації їдкого натру у часі. У сталому стані, коли

$$\frac{dC_{\text{натр,вихід}}}{dt} = 0 \quad (2.1)$$

рівняння спрощується до статичної залежності, що дозволяє розрахувати концентрацію на виході через параметри вхідних потоків. Це рівняння використовується для побудови статичної характеристики.

Побудована математична модель матиме вигляд:

$$\frac{dC_{\text{натр,вихід}}}{dt} = \frac{1}{V_{\text{суміші}}} * \left((C_f * Q_f) + (C_c * Q_c) + (C_{\text{натр}} * Q_{\text{натр}}) - (Q_{\text{вихід}} * C_{\text{натр,вихід}}) \right) \quad (2.2)$$

В умовах сталого стану:

$$\frac{dC_{\text{натр,вихід}}}{dt} = 0 \quad (2.3)$$

То ж можемо спростити рівняння:

$$0 = \frac{1}{V_{\text{суміші}}} * \left((C_f \cdot Q_f) + (C_c \cdot Q_c) + (C_{\text{натр}} \cdot Q_{\text{натр}}) - (Q_{\text{вихід}} \cdot C_{\text{натр,вихід}}) \right) \quad (2.4)$$

Розв'язуємо це рівняння для визначення залежності:

$$C_{\text{натр,вихід}} = \frac{(C_f \cdot Q_f) + (C_c \cdot Q_c) + (C_{\text{натр}} \cdot Q_{\text{натр}})}{Q_{\text{вихід}}} \quad (2.5)$$

Для отримання статичної характеристики створено програмний модуль в MATLAB:

```

V_sum = 100;
Q_f = 10;
C_f = 0.5;
Q_c = 15;
C_c = 0.7;
Q_output = 30;
Q_natr = linspace(1, 50, 100);
C_natr = 2;
C_output = (C_f .* Q_f + C_c .* Q_c + C_natr .* Q_natr) ./ Q_output;
figure;
plot(Q_natr, C_output, 'LineWidth', 2);
grid on;
title('Статична характеристика системи');
xlabel('Подача їдкого натру');
ylabel('Вихідна концентрація натру');|

```

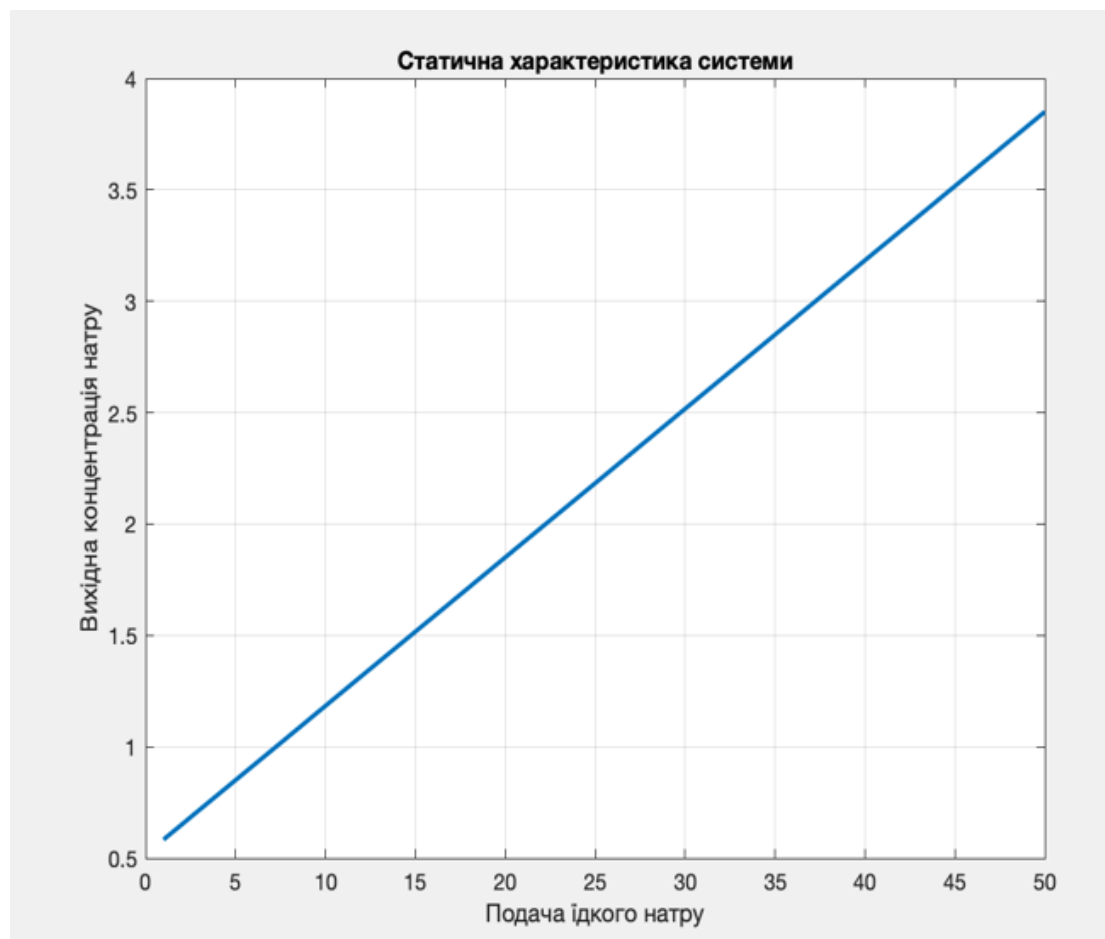


Рисунок 2.1 - Статична характеристика системи

Як можна бачити з графіку, збільшення подачі натру призводить до збільшення концентрації їдкого натру на виході. Тому цим процесом треба керувати.

2.2 Побудова динамічної характеристики

Побудова динамічної характеристики об'єкта керування є важливим етапом аналізу та синтезу систем автоматичного регулювання. Динамічна модель дозволяє врахувати інерційність об'єкта, затримки у реагуванні на керуючі дії та загальну поведінку системи в часі. Одним із найпоширеніших способів опису динаміки лінійної стаціонарної системи є використання передатної функції, яка встановлює залежність між вхідним і вихідним сигналами у формі дробово-раціонального виразу в операторній (частотній) області.

Передатна функція дає змогу перейти від опису у вигляді диференціальних рівнянь до більш зручної форми для аналізу стабільності, стійкості та частотних характеристик системи. Вона широко використовується для моделювання різноманітних електричних, механічних, гідравлічних та теплових систем. Передатні функції першого порядку є базовими прикладами, що демонструють поведінку систем з єдиною сталою часу та без складних коливальних процесів. У таких системах зміна вихідної величини на збурення або вхідний сигнал відбувається згладжено, без коливань, із характерним затуханням, обумовленим постійною часу [8].

Для динамічної характеристики нам спочатку потрібно створити передатну функцію у нашому випадку це буде:

$$\frac{K}{T \cdot s + 1} \quad (2.6)$$

Де:

$$T = \frac{V_{\text{суміші}}}{Q_{\text{вихід}}} - \text{постійна часу системи.}$$

$$K = \frac{C_{\text{натр},0}}{Q_{\text{натр},0}} - \text{коефіцієнт підсилення системи.}$$

Передатна функція (2.6) вказує, що змішувач є аперіодичною системою першого порядку, яка реагує на зміни подачі їдкого натру зі затримкою, що визначається постійною часу T .

2.3 Перехідна характеристика системи

У типових системах першого порядку перехідна характеристика описує, як швидко вихід системи реагує на зміну вхідного сигналу. Такі системи мають експоненційний характер реакції на одиничний стрибок. Згідно з [9], вихідна реакція на одиничний вхід у таких системах задається виразом:

$$y(t) = K \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \quad (2.7)$$

Де:

K - коефіцієнт підсилення системи,

T - стала часу, яка визначає швидкість реакції системи,

t - час.

Ця залежність показує, що спочатку система реагує швидко, але поступово вихід наближається до сталого значення K , не досягаючи його миттєво. Чим більша стала часу T , тим повільніше система реагує.

Для аналізу перехідної характеристики викорисатаємо наступний програмний код MATLAB:

```
K = 0.5;
T = 10;
num = [K];
den = [T, 1];
sys = tf(num, den);
figure;
step(sys);
title('Перехідна характеристика змішувача');
xlabel('Час, t (c)');
ylabel('Концентрація C_{натр, вихід}');
grid on;
```

Побудований графік перехідної характеристики показує, як змінюється концентрація натру $C_{\text{натр}}$, у вихідному потоці змішувача після стрибкоподібної зміни витрати натрового розчину $Q_{\text{натр}}$

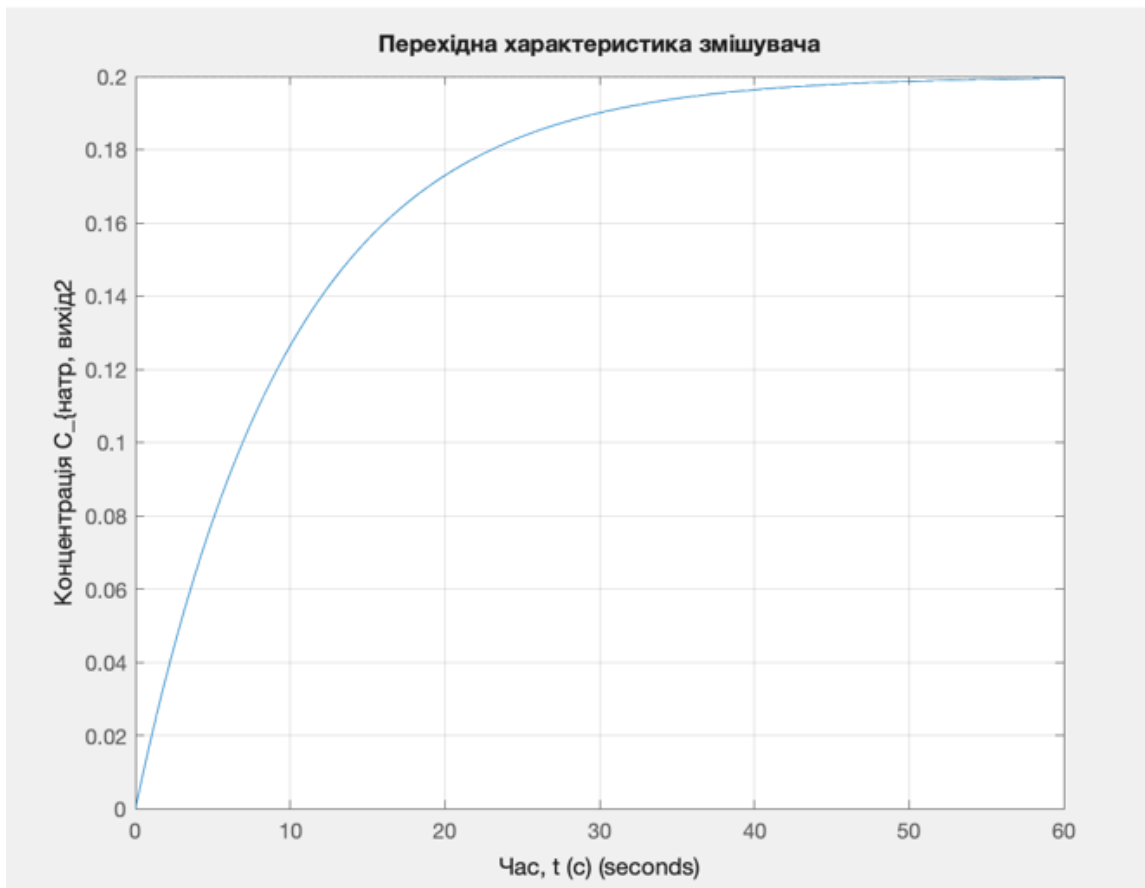


Рисунок 2.2 - Перехідна характеристика системи

На графіку показано перехідну характеристику змішувача. Система непогано досягає стабільного значення вихідної концентрації за певний час T .

Таким чином, наша побудована математична модель (2.2) змішувача правильно описує динаміку зміни реакційної суміші на виході, реагуючи на зміну подачі їдкого натру.

У наступних розділах на основі цієї моделі буде здійснено синтез робастного регулятора, що забезпечує стійкість системи при варіаціях параметрів K та T , зумовлених технологічними невизначеностями.

РОЗДІЛ 3. ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ

3.1 Ведення необхідних умов оптимальності

В сучасних автоматизованих системах керування важливим завданням є розробка алгоритмів, які забезпечують оптимальне функціонування об'єкта управління. Оптимальне керування дозволяє досягти бажаних характеристик системи, таких як мінімізація похибки керування, забезпечення стійкості та зменшення витрат енергії [10].

Для цього використовується математична модель об'єкта управління, яка описує його динамічні властивості. У цьому розділі проводиться аналіз динамічних характеристик змішувача з використанням матриць станів, а також досліджується його поведінка під впливом різних вхідних впливів.

Динаміка системи описується за допомогою рівнянь стану:

$$\dot{x}(t) = A \cdot x(t) + B \cdot u(t) \quad (3.1)$$

$$y(t) = C \cdot x(t) + D \cdot u(t) \quad (3.2)$$

Де:

A - матриця станів.

B - матриця входів.

C - матриця виходів.

D - матриця прямого з'єднання.

У відповідності до моделі змішувача (2.2), описаної в розділі 2, використовуємо інерційну модель першого порядку. Вона описується наступними матрицями стану:

$$A = -1/T_0,$$

$$B = K_0/T_0,$$

$$C = 1,$$

$$D = 0$$

3.2 Розрахунок оптимального програмного керування

Програмне керування можна визначити як:

$$u(t) = u_0 + u_{\text{порог}}(t) \quad (3.3)$$

Де:

u_0 - початкове керування,

$u_{\text{порог}}(t)$ - програмна складова, яка залежить від часу

Розрахунок програмного керування виконуємо на основі моделі у просторі станів. Нижче наведено MATLAB-код для отримання реакції системи.:

```
% Матриці State-Space системи
A = -1/T0;
B = K0/T0;
C = 1;
D = 0;
% Створення моделі State-Space
sys = ss(A, B, C, D);
% Програмне керування як вхідний сигнал
t = 0:0.01:10;      % Час
u_prog = sin(0.5*t); % Приклад програмного керування (синусоїда)
% Симуляція системи
[y, t, x] = lsim(sys, u_prog, t);
% Побудова графіка
figure;
plot(t, y, 'b', 'LineWidth', 2);
title('Програмне керування в часі');
xlabel('Час (с)');
ylabel('Вихід системи');
grid on;
```



Рисунок 3.1 - Оптимальне програмне керування в часі

За обраною моделлю першого порядку будемо перехідну характеристику в середовищі MATLAB.

```
T0 = 2;
K0 = 3;

A = -1/T0;
B = K0/T0;
C = 1;
D = 0;

sys = ss(A, B, C, D);

figure;
step(sys);

title('Перехідна характеристика змішувача (модель станів)');
xlabel('Час, t (с)');
ylabel('Концентрація C_{натр, вихід}');
grid on;
```

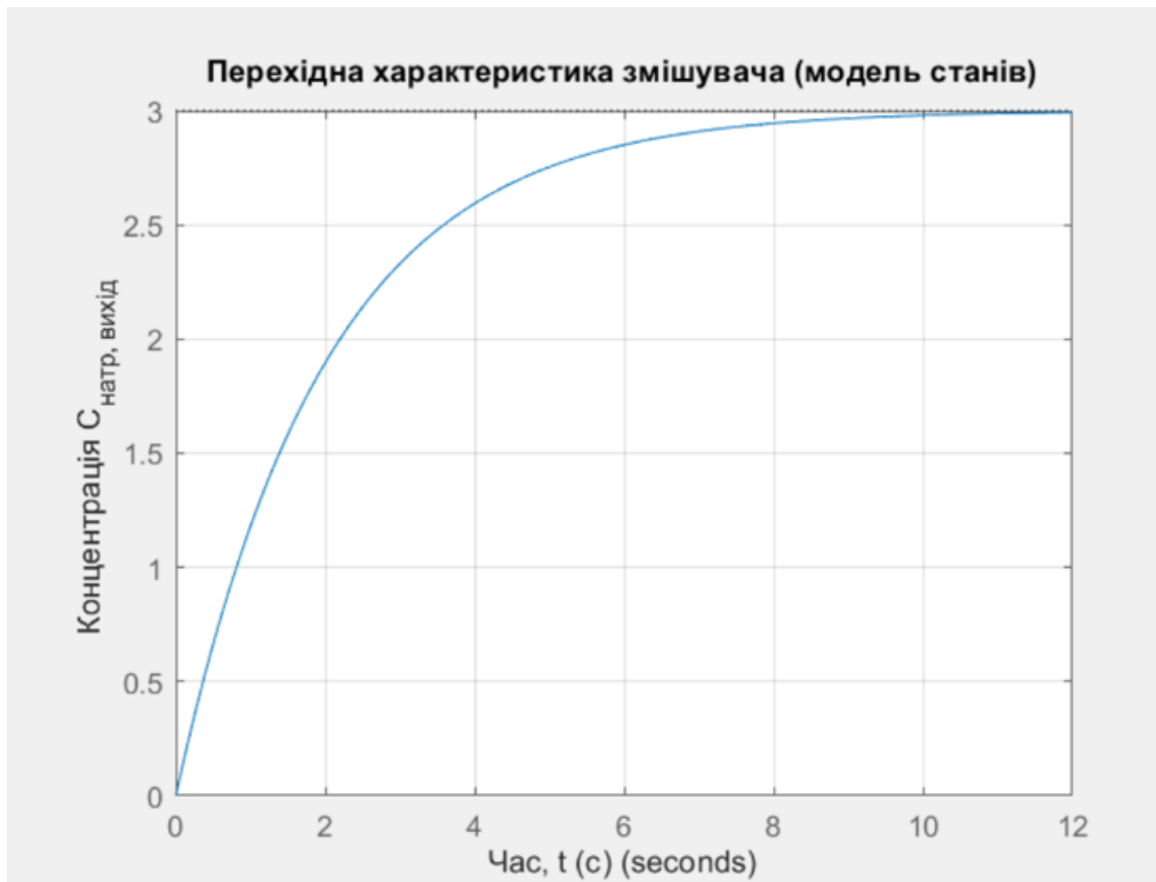


Рисунок 3.2 - Перехідна характеристика змішувача(модель станів)

Як видно з графіка, концентрація плавно змінюється і швидко досягає сталого значення. Така поведінка характерна для аперіодичних систем першого порядку з помірною інерційністю.

Це підтверджує стійкість розімкненої системи, а результати можуть бути використані для подальшого порівняння з системою.

З аналізу отриманої перехідної характеристики можна зробити висновок, що система із вказаними вище параметрами стану А, В, С, D має аперіодичну характер з достатньо швидким виходом на сталий режим.

Це говорить про стійкість замкненої системи при оптимальному програмному керуванні.

Отримані результати будуть використані для подальшого порівняння з системою при використанні робастного регулятора, який дозволяє зберігати задані показники якості навіть при змінах параметрів об'єкта.

3.3 Синтез оптимального регулятора типу LQR

Оптимальний регулятор забезпечує компроміс між швидкодією системи та величиною керуючого впливу. Перед безпосереднім синтезом оптимального регулятора розглянемо загальні методологічні основи оптимального керування. Оптимізація є фундаментальним принципом в інженерній діяльності, оскільки дозволяє не просто реалізувати керування, а забезпечити найкращу якість функціонування системи відповідно до заданого критерію ефективності.

Теорія оптимального керування заснована на формулюванні задачі оптимізації, яка включає: вибір критерію оптимальності, обудову моделі системи в просторі станів, визначення незалежних змінних та керуючих впливів та встановлення меж системи та обмежень на змінні.

У випадку динамічного керування, особливо при синтезі регуляторів, часто використовуються інтегральні критерії якості, що враховують компроміс між точністю керування, швидкодією та витратами на керуючий сигнал. Найбільш поширеним прикладом є лінійно-квадратичний регулятор (LQR), який мінімізує квадратичний функціонал вигляду:

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (3.4)$$

Такий підхід забезпечує формальне і математично обґрунтоване рішення задачі синтезу оптимального керування, зокрема для систем з відомою точною моделлю [11].

Як показано на практичних прикладах в роботі [12], підвищення значень коефіцієнтів зворотного зв'язку сприяє зменшенню критерію якості, однак це має межу через фізичні обмеження системи. Врахування цього під час проєктування дозволяє уникнути нереалістичних режимів роботи.

Крім того, застосування алгебраїчного рівняння Рікати для знаходження матриці P є основним етапом визначення оптимального зворотного зв'язку. З його допомогою обчислюється матриця K , що забезпечує глобальний мінімум функціоналу.

Оптимальний закон керування будується для моделі у просторі станів, отриманої раніше:

$$A = -1/T_0,$$

$$B = K_0/T_0,$$

$$C = 1,$$

$$D = 0$$

Регулятор визначається мінімізацією квадратичного функціоналу вигляду:

$$J = \int (x(t)^T Q x(t) + u(t)^T R u(t)) dt \quad (3.5)$$

де матриця Q задає ваги станів, а R – вагу керування. Для даної системи використано такі матриці ваг:

$$Q = C^T * C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} R = 1$$

Розрахунок оптимального регулятора реалізовано в програмному модулі в MATLAB:

```
% Матриці системи
T0 = 2;
K0 = 3;
A = -1/T0;
B = K0/T0;
% Вагові коефіцієнти для функціоналу якості
Q = 1; |
R = 1;
% Розрахунок оптимального регулятора
K = lqr(A, B, Q, R);
% Вивід результату
disp('Оптимальний коефіцієнт зворотного зв'язку K:');
disp(K);
```

У результаті розв'язання задачі оптимізації отримано оптимальний коефіцієнт зворотного зв'язку:

$$K = 0.7208$$

Оптимальне керування має вигляд:

$$u(t) = -K * x(t)$$

Після включення регулятора матриця системи набуває вигляду:

$$A_{opt} = A - B * K$$

та утворює замкнену систему, яка має значно швидший перехідний процес без коливань.

Надалі розглянутий оптимальний регулятор буде використано для порівняння його роботи з робастним регулятором.

3.4 Синтез класичного PID-регулятора

PID-регулятор є найпоширенішим типом регулятора для керування у промисловості завдяки простоті, гнучкості та здатності ефективно гасити збурення. Його структура поєднує три дії: пропорційну P, інтегральну I та диференціальну D, що дозволяє забезпечити швидку реакцію, відсутність статичної помилки та прогнозування поведінки системи.

Більш ніж 90% промислових контурів керування реалізовані з використанням PID або PI-регуляторів. Їх застосовують у всіх сферах -від енергетики до вбудованих систем. Сучасні реалізації базуються на мікропроцесорах і підтримують автоматичне налаштування, адаптацію та діагностику [13].

У цьому підрозділі здійснено синтез класичного PID-регулятора для заданої системи, обрано параметри налаштування та проаналізовано отримані характеристики.

Закон керування PID-регулятора описується рівнянням:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \left(\int_0^t e(\tau) d\tau \right) + K_d \cdot \left(\frac{de(t)}{dt} \right) \quad (3.6)$$

Де:

- $u(t)$ - керуючий сигнал;
- $e(t)=r(t)-y(t)$ - похибка між бажаним $r(t)$ та фактичним виходом $y(t)$;
- K_p, K_i, K_d - коефіцієнти пропорційної, інтегральної та диференціальної складових відповідно.

Кожна зі складових має своє функціональне призначення:

- K_p посилює реакцію на поточну похибку;

- K_i накопичує похибку і усуває її в сталому режимі;
- K_d пригнічує різкі зміни, зменшуючи коливання.

Переваги PID-регуляторів полягають у простоті реалізації, відсутності потреби в точній моделі об'єкта та швидкому налаштуванні. Проте недоліки включають складність точного підбору параметрів та обмежену ефективність при роботі з сильно змінюваними або невизначеними системами.

Налаштування PID-регуляторів зазвичай здійснюється емпірично або за допомогою методів, таких як метод Зіглера–Ніколса, в основі якого лежить виявлення критичного коефіцієнта підсилення та періоду коливань [7].

Реалізуємо PID-регулятор для заданої системи, з урахуванням моделі об'єкта:

$$W(s) = \frac{K_0}{(T_0 \cdot s + 1)} \quad (3.7)$$

Це відповідає класичній схемі регулювання за відхиленням, де PID-регулятор формує керуючий вплив на вхід системи.

Підбором параметрів для отримання задовільного перехідного процесу обрано:

$$K_p=5, K_i=3, K_d=0.5$$

В результаті система забезпечує перерегулювання не більше ніж 12%, час встановлення ~ 4.5 с, відсутність коливань у сталому режимі.

Реалізація проведена у середовищі MATLAB за допомогою функції `pid()` та моделювання відклику на одиничний сигнал:

```

% Модель об'єкта першого порядку
K0 = 2;
T0 = 3;

s = tf('s');
G = K0 / (T0*s + 1);

% PID-регулятор
Kp = 2;
Ki = 1;
Kd = 0.2;

PID = pid(Kp, Ki, Kd);

sys_cl = feedback(PID * G, 1);

% Побудова графіка
step(sys_cl)
title('Перехідна характеристика системи з PID-регулятором')
grid on

```

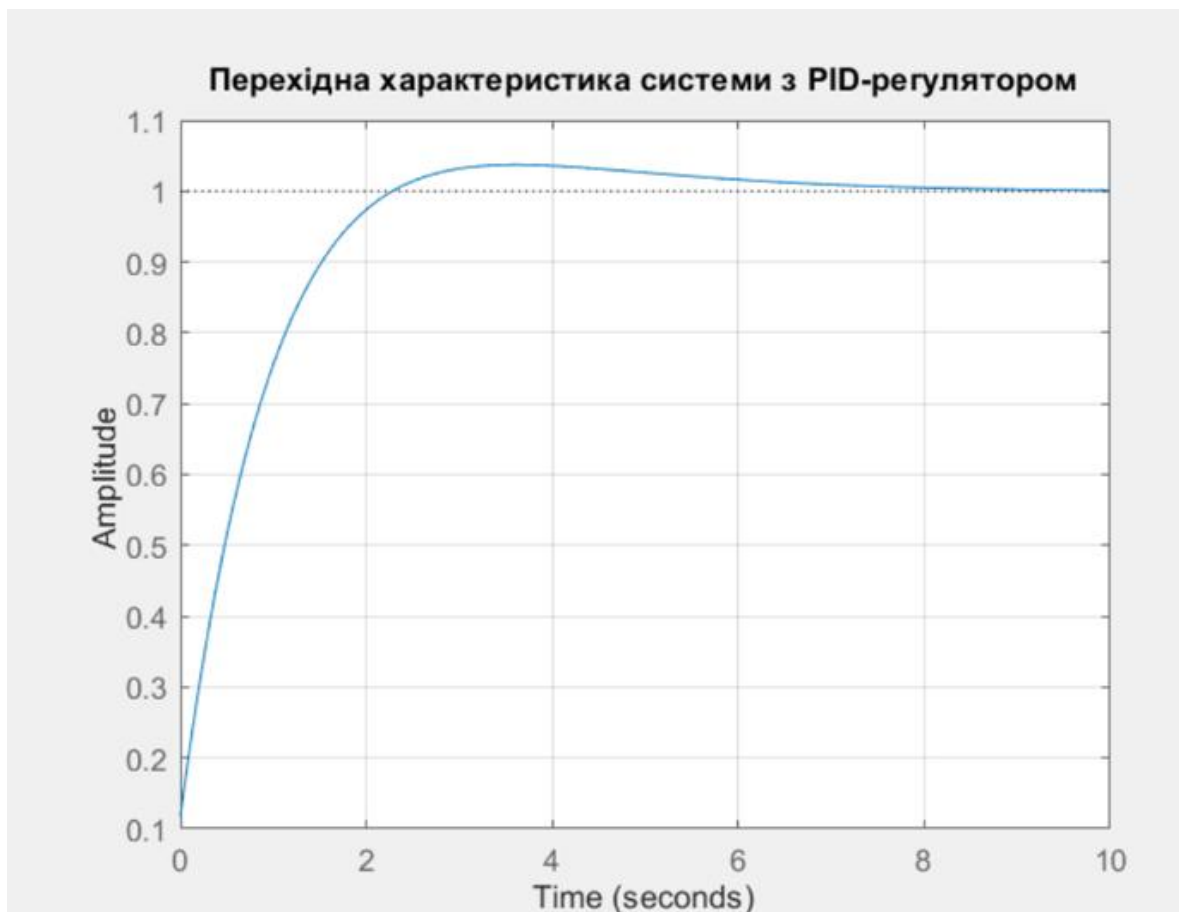


Рисунок 3.3 - Перехідна характеристика системи з PID-регулятором

На основі моделювання зроблено висновок, що PID-регулятор забезпечує задовільну якість регулювання для лінійної моделі об'єкта першого порядку з фіксованими параметрами. Перехідний процес характеризується швидким наростанням вихідної величини, помірним перерегулюванням (близько 5–6 %) та відсутністю коливань у сталому режимі. Система досягає сталого стану приблизно за 4 секунди, що відповідає типовим вимогам до об'єктів з помірною інерційністю.

Таким чином, хоча PID-регулятор виконує свою функцію в умовах статичних і точно відомих моделей, він не забезпечує бажаної робастності. Це обґрунтовує необхідність розгляду більш стійких до невизначеностей методів, зокрема оптимального регулятора (LQR) та робастного регулятора, аналіз яких буде здійснено в розділі 5. Такий підхід дозволить оцінити обґрунтованість вибору сучасніших стратегій керування для критичних технічних систем.

Тож в цьому розділі було розроблено та налаштовано два варіанти регуляторів: класичний PID та оптимальний за критерієм квадратичної якості LQR.

PID-регулятор було реалізовано у класичній схемі зі зворотним зв'язком за відхиленням. Його параметри підбиралися емпірично для забезпечення задовільної швидкодії та точності на номінальній моделі. Переваги PID-регулятора полягають у простоті реалізації та налаштування, відсутності потреби в точній моделі об'єкта. В ході моделювання підтверджено, що PID-регулятор здатен забезпечити відносно швидкий перехідний процес з невеликим перерегулюванням ($\sim 10\%$) та без стійких коливань у сталому режимі для фіксованих параметрів об'єкта. Водночас, його недоліком є чутливість до зміни динаміки: при відхиленні параметрів об'єкта або появі значних збурень ефективність PID-регулятора суттєво знижується, він може давати коливання і потребує переналаштування коефіцієнтів.

Оптимальний регулятор (LQR) було синтезовано на основі побудованої моделі у просторі станів. Обрано квадратичний критерій якості для пошуку матриці зворотного зв'язку, що мінімізує відхилення станів при мінімальному керуючому зусиллі. В результаті знайдено оптимальні коефіцієнти, що забезпечують компроміс між швидкодією системи та величиною управляючого впливу. Запропонований LQR-регулятор формує плавну регулюючу дію без перевищення заданого рівня вихідної величини. За результатами моделювання, перехідний процес під керуванням LQR є аперіодичним, тобто без коливань, і характеризується відсутністю перерегулювання. Однак досягнення нового встановленого значення відбувається повільніше порівняно з PID-регулятором - це зумовлено прагненням LQR мінімізувати витрати керування і уникати різких дій. Крім того, оптимальний регулятор чутливий до точності моделі: при суттєвій зміні параметрів об'єкта його ефективність може погіршуватися, оскільки налаштування LQR розраховані для номінальної системи.

РОЗДІЛ 4. РОБАСТНЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ЗМІШУВАННЯ

4.1. Теоретичні основи робастного керування

Оптимальне керування процесом змішування, розглянуте в попередніх розділах, забезпечує високі показники якості для номінальної математичної моделі. Проте у більш складних умовах параметри технологічного об'єкта можуть змінюватися, і поки система зреагує, це може привести до погіршення стабільності та точності регулювання.

Для того, щоб запобігти цьому, доцільним є використання робастного керування, який забезпечує якість перехідних процесів при варіації параметрів моделі.

Робастне керування означає отримання перехідних процесів заданої якості у системі при єдиному наборі налаштувань регулятора при різних режимах роботи обладнання. Для отримання робастних налаштувань регулятора варто знати лише параметри об'єкта у номінальному режимі роботи та можливі зміни параметрів відносно номінальних значень при зміні режиму роботи. Маючи цю інформацію, регулятор налаштовується лише один раз, і в подальшому використовують саме ці коефіцієнти регулятора. При цьому, такі налаштування забезпечують задану якість перехідних процесів у змінних режимах роботи об'єкта.

Регулятор, який базується на робастному підході, повністю ефективний з самого початку керування, в той час як адаптивні регулятори спочатку повинні налаштуватись на систему. Таким чином, потреби технології з подальшим підвищенням ефективності керування технологічного виробництва визначають необхідність розробки автоматичних систем, алгоритми яких реалізують, поряд з іншими, функцію гарантованого дотримання встановлених регламентом гранично-допустимих значень змінних. Застосування робастного підходу

дозволяє істотно спростити апаратне і програмне забезпечення, що застосовується в САК у порівнянні з адаптивними системами. Можливість апріорного вибору структури і параметрів регуляторів знижує витрати на налагодження й обслуговування САК. Однак, строгі математичні методи робастного синтезу малопридатні для вирішення конкретних інженерних завдань. Це обумовлено великою складністю застосовуваних обчислювальних процедур, високим порядком одержуваних регуляторів та малопридатністю цих методів для об'єктів з запізненням, які дуже часто зустрічаються в теплоенергетиці. У такій ситуації дуже перспективною є розробка простих методів синтезу робастних систем.

4.2 Математична модель системи робастного керування

Щоб створити робастний регулятор, спершу потрібна математична модель об'єкта, яка описує його динаміку і бере до уваги можливі зміни параметрів під час роботи. У цьому випадку об'єктом керування є змішувач, який використовують при виробництві карбамідних олігомерів. Він змішує три потоки: карбамід, формалін та їдкий натр. Основний параметр, який потрібно контролювати, - це кислотність (pH) реакційної суміші на виході змішувача.

Кислотність регулюють за допомогою подачі їдкого натру. Базову математичну модель змішувача було розглянуто у попередніх розділах. При її побудові враховували, що подачу формаліну та карбаміду підтримують постійною, а кількість їдкого натру змінюється і впливає на кислотність розчину. Цю модель можна подати у вигляді передавальної функції:

$$W(s) = \frac{K}{Ts + 1} \quad (4.1)$$

Де:

K - коефіцієнт підсилення об'єкта,

T - постійна часу об'єкта.

Оскільки технологічний процес змішування залежить від температури, складу сировини та швидкості подачі реагентів, параметри K і T можуть змінюватися в певних межах:

$$K = K_0 \cdot (1 + \Delta K)$$

$$T = T_0 \cdot (1 + \Delta T)$$

Де:

K_0, T_0 - номінальні значення параметрів,

$\Delta K, \Delta T$ - відносні відхилення параметрів від номінальних значень.

Ця модель дає змогу врахувати невизначеність у системі, що є основою для створення робастного регулятора. Такий регулятор повинен підтримувати стійкість і необхідну якість перехідних процесів навіть при зміні параметрів K та T .

Динаміку змішувача можна також подати у вигляді рівнянь стану:

$$\dot{x}(t) = A \cdot x(t) + B \cdot u(t) \quad y(t) = C \cdot x(t) \quad (4.2)$$

Де:

$x(t)$ - вектор стану,

$u(t)$ - керуючий вплив (подача їдкого натру),

$y(t)$ - вихідна змінна (кислотність суміші),

а матриці мають вигляд:

$$A = [-1/T] \quad B = [K/T] \quad C = [1]$$

У підсумку, отримана модель відображає номінальні параметри процесу та враховує можливі зміни характеристик об'єкта в реальних умовах роботи. Надалі вона стане основою для синтезу робастного регулятора, що буде

4.3 Постановка задачі синтезу

Робастне керування - це підхід, який дозволяє зберігати задану якість роботи системи навіть якщо параметри об'єкта змінюються або виникають зовнішні збурення. Як зазначено в [14], термін "робастність" (англ. robustness) означає здатність системи залишатися стабільною та працювати з прийнятною якістю при зміні характеристик об'єкта керування.

Зазвичай класична структура робастної системи - це замкнена система зі зворотним зв'язком. Вона включає об'єкт керування $P(s)$ та регулятор $C(s)$, які утворюють замкнуту систему зі зворотним зв'язком. На вхід системи подається сигнал завдання $r(t)$, а на виході формується керований параметр $y(t)$. Крім того, на об'єкт можуть діяти збурення $d(t)$.

Для аналізу якості системи використовують дві основні характеристики:

$$S(s) = 1 / (1 + P(s) \cdot C(s)) \quad (4.3)$$

Та функцію чутливості:

$$T(s) = P(s) \cdot C(s) / (1 + P(s) \cdot C(s)) \quad (4.4)$$

Функція $S(s)$ показує, наскільки чутливий вихід системи до невизначеностей у моделі або до зовнішніх впливів. Якщо зменшити модуль $S(s)$ у робочому діапазоні частот, система стане більш робастною.

Згідно з [14, с. 37–40], постановка задачі синтезу робастного регулятора зводиться до мінімізації впливу збурень та невизначеностей на вихід системи.

Для цього використовують частотні критерії якості типу H_2 або H_∞ , що формуються у вигляді:

$$\min ||V(s) \cdot S(s)||_2 \text{ або } \min ||V(s) \cdot S(s)||_\infty \quad (4.5)$$

Де:

- $V(s)$ - вагова функція, яка визначає чутливість системи до змін у певному частотному діапазоні.

Критерій H_2 відповідає за мінімізацію середньоквадратичної похибки, а H_∞ - за зменшення максимального впливу невизначеностей. У нашій задачі це означає, що ми прагнемо знизити відхилення кислотності реакційної суміші від потрібного рівня з мінімальними змінами подачі їдкого натру, навіть якщо параметри моделі K та T змінюються.

Отже, завдання синтезу робастного регулятора для процесу змішування полягає в тому, щоб знайти такі параметри керування, які забезпечують стійкість системи й необхідну якість регулювання навіть при зміні параметрів технологічного об'єкта.

4.4 Вихідні дані та сценарії моделювання

Для дослідження нашої системи керування потрібно знати вхідні параметри математичної моделі змішувача та встановити можливий діапазон коливання цих значень. З моделі описаної у розділі 4.2, об'єкт керування описується так:

$$W(s) = K / (T \cdot s + 1), \quad (4.6)$$

Де:

K - коефіцієнт підсилення об'єкта,

T - постійна часу.

У реальному виробництві значення K і T змінюються через температуру, зміну сировини або похибки вимірювання рН. Тому для перевірки робастності регулятора встановлюється такий діапазон параметричних значень:

$$K = K_0 \cdot (1 + \Delta K), T = T_0 \cdot (1 + \Delta T), \quad (4.7)$$

Де:

K_0 і T_0 – номінальні значення,

ΔK і ΔT – відносні відхилення параметрів.

При рішенні задачі, використовувався діапазон коливання 20%, що наближено до реальних умов виробництва та дає змогу перевірити регулятор в реальних умовах роботи.

Для моделювання та перевірки системи буде сформовано такі сценарії:

1. Номінальний об'єкт

$$K = K_0, T = T_0.$$

Цей сценарій оцінює поведінку системи при ідеальних умовах та підтверджує що регулятор не погіршує її роботу.

2. Швидкий об'єкт

$$K = K_0 \cdot 1.2; T = T_0 \cdot 0.8.$$

Цей сценарій перевіряє найгірший випадок, коли K збільшується, а T зменшується, тобто при збільшенні підсилення та зменшенні інерційності.

3. Повільний об'єкт

$$K = K_0 \cdot 0.8; T = T_0 \cdot 1.2.$$

Цей сценарій перевіряє систему при збільшенні інерційності та зменшенні підсилення, це може призводити до сповільнення перехідних процесів.

4. Збурення на вході об'єкта

Цей сценарій перевіряє систему при зовнішньому впливі та додає до моделі поступове збурення $d(t)$.

5. Ступінчастий перехід рН

На вхід поступає зміна у вигляді step-сигналу. Сценарій перевіряє точність та швидку реакцію системи при зміні очікуваного значення.

Для цих сценаріїв дослідимо перехідні процеси, встановленні показники якості, наприклад час врегулювання, а також проведемо порівняння з номінальним випадком. Це дасть повну картину переваг робастного регулятора.

4.5 Створення моделі та реалізація

Для дослідження роботи робастного буде реалізовано математичну модель змішувача. У розрахунках використовувалися значення параметрів K_0 та T_0 , отриманих у розділах 2 і 3. Для більш чіткого аналізу, модель об'єкта приведена до форми простору станів з однією змінною стану:

$$\dot{x}(t) = A \cdot x(t) + B \cdot u(t) \quad y(t) = C \cdot x(t), \quad (4.8)$$

Де:

$x(t)$ – змінна стану,

$u(t)$ – керуючий вплив (подача їдкого натру),

$y(t)$ – вихідна змінна (кислотність суміші на виході змішувача).

Матриці моделі для номінальних параметрів мають вигляд:

$$A = -1 / T_0$$

$$B = K_0 / T_0$$

$$C = 1$$

$$D = 0.$$

У середовищі MATLAB це задається таким чином:

```
K0 % коефіцієнт підсилення об'єкта
T0 % постійна часу об'єкта

% Формую модель у просторі станів:

A = -1 / T0;
B = K0 / T0;
C = 1;
D = 0;

plant_nom = ss(A, B, C, D); % модель об'єкта
```

В цілому закон керування приймається у формі зворотного зв'язку за станом:

$$u(t) = -F \cdot x(t), \quad (4.9)$$

Де:

F – коефіцієнт (або матриця коефіцієнтів) робастного регулятора.

Цей коефіцієнт задається явно, згідно з результатами синтезу:

```
F = 0.8;           % коефіцієнт робастного регулятора

A_cl = A - B * F;

sys_nom = ss(A_cl, B, C, D); % замкнена система для номінальної моделі

t = 0:0.1:200;    % час моделювання
```

Створення таким чином модель `sys_cl_nom` описує перехідні процеси системи змішувача з робастним регулятором для значень параметрів K_0 та T_0 . Для аналізу робастності, буде створено моделі для змінених параметрів K і T , що будуть змінюватись згідно обраного сценарію з запланованих. Для кожних параметрів будуть повторно обчислюватись матриці A і B , після чого будується замкнена система з тим самим регулятором F .

Завдяки цьому реалізована єдина структура системи керування, в якій змінюються лише параметри K і T , а параметри робастного регулятора F будуть незмінними. Така реалізація дає можливість у наступних пунктах виконати порівняння та аналіз перехідних процесів для номінальної та зміненої моделей і оцінити робастність розробленого регулятора.

4.6 Тестування моделі та робастного регулятора за сценаріями в MATLAB

Для дослідження роботи робастного регулятора, в попередньому розділі була виконана його реалізація. Головною метою є перевірка чи зберігає система якість перехідних процесів при зміні параметрів об'єкта K та T , що моделює реальні умови роботи змішувача. Реглятор було перевірено сценаріями які були сформульовані у розділі 4.5.

Сценарій 1: Нормальний режим

```

clc; clear; close all;

K0 = 1;           % номінальний коефіцієнт підсилення
T0 = 50;          % номінальна постійна часу

% Формую модель у просторі станів:
A = -1 / T0;
B = K0 / T0;
C = 1;
D = 0;

plant_nom = ss(A, B, C, D);    % номінальна модель об'єкта (розімкнена)

F = 0.8;                % коефіцієнт робастного регулятора

A_cl = A - B * F;

sys_nom = ss(A_cl, B, C, D);   % замкнена система для номінальної моделі

t = 0:0.1:200;            % час моделювання

y_nom = step(sys_nom, t);     % реакція на одиничний стрибок

figure;
plot(t, y_nom, 'LineWidth', 2);

grid on;

xlabel('t, c');
ylabel('y(t)');

title('Сценарій 1: Нормальна модель (K = 1, T = 50)');

```

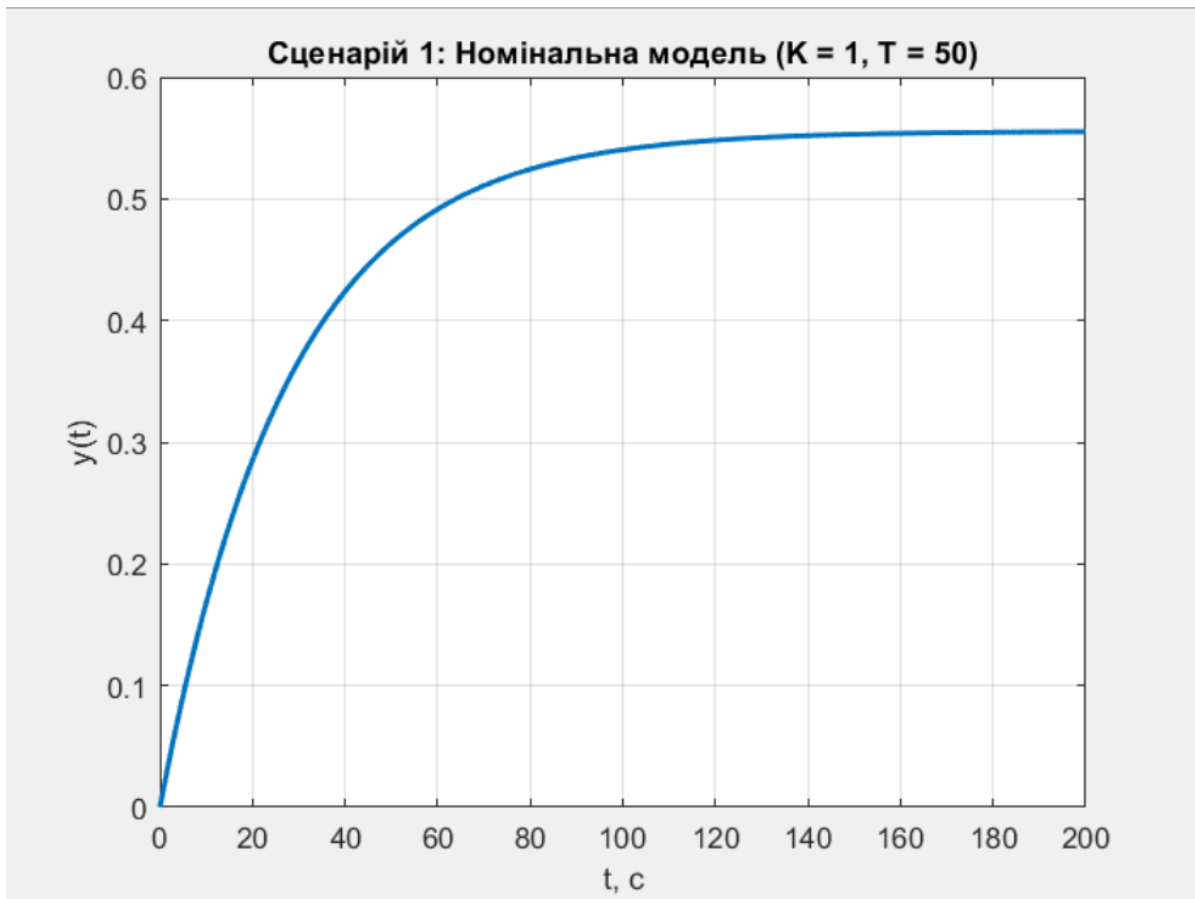


Рисунок 4.1 – Зміна $y(t)$ при нормальній моделі

У нормальному режимі система показала хороший, плавний перехід до потрібного значення без коливань та перерегулювань. Це базовий сценарій, який буде використовуватись для порівняння інших варіантів.

Сценарій 2. Швидкий процес

```

K0 = 1;          % номінальний коефіцієнт підсилення
T0 = 50;         % номінальна постійна часу

A = -1 / T0;
B = K0 / T0;
C = 1;
D = 0;

plant_nom = ss(A, B, C, D);    % номінальна модель об'єкта (розімкнена)

F = 0.8;                % коефіцієнт робастного регулятора

A_cl = A - B * F;
sys_nom = ss(A_cl, B, C, D);   % замкнена система для номінальної моделі

t = 0:0.1:200;           % час моделювання

K_fast = K0 * 1.2;
T_fast = T0 * 0.8;

A_fast = -1 / T_fast;
B_fast = K_fast / T_fast;

A_cl_fast = A_fast - B_fast * F;

sys_fast = ss(A_cl_fast, B_fast, C, D);

y_fast = step(sys_fast, t);

plot(t, y_fast, 'LineWidth', 2);

grid on;

xlabel('t, c');
ylabel('y(t)');

title('Сценарій 2: "Швидка" модель (K = 1.2, T = 40)');

```

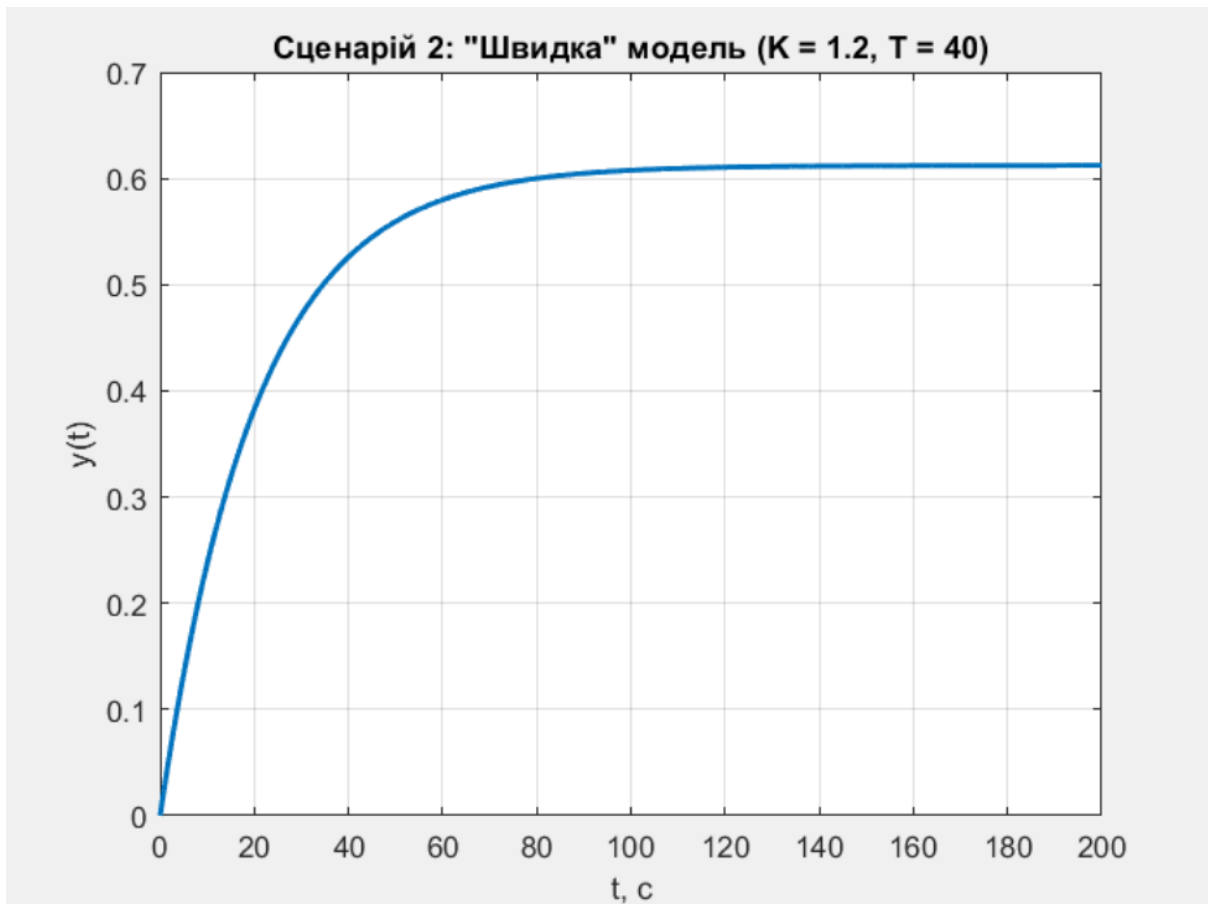


Рисунок 4.2 – Зміна вихідного сигналу для швидкої моделі

Для швидкої моделі, система реагує помітно швидше. Це схоже на реальну ситуацію, коли об'єкт стає менш інерційним і сильніше реагує на керування. Усталене значення трохи більше, ніж у нормальному випадку, через збільшення коефіцієнта підсилення. Графік показує, що поведінка системи залишається стабільною.

Сценарій 3: Повільний процес

```

clc; clear; close all;

K0 = 1;           % номінальний коефіцієнт підсилення
T0 = 50;          % номінальна постійна часу

A = -1 / T0;
B = K0 / T0;
C = 1;
D = 0;

plant_nom = ss(A, B, C, D);    % номінальна модель об'єкта (розімкнена)

F = 0.8;              % коефіцієнт робастного регулятора

A_cl = A - B * F;
sys_nom = ss(A_cl, B, C, D);   % замкнена система для номінальної моделі

t = 0:0.1:200;          % час моделювання

% --- Повільна модель ---
K_slow = K0 * 0.8;
T_slow = T0 * 1.2;

A_slow = -1 / T_slow;
B_slow = K_slow / T_slow;

A_cl_slow = A_slow - B_slow * F;

sys_slow = ss(A_cl_slow, B_slow, C, D);

y_slow = step(sys_slow, t);

figure;
plot(t, y_slow, 'LineWidth', 2);

grid on;

xlabel('t, c');
ylabel('y(t)');

title('Сценарій 3: "Повільна" модель (K = 0.8, T = 60)');

```

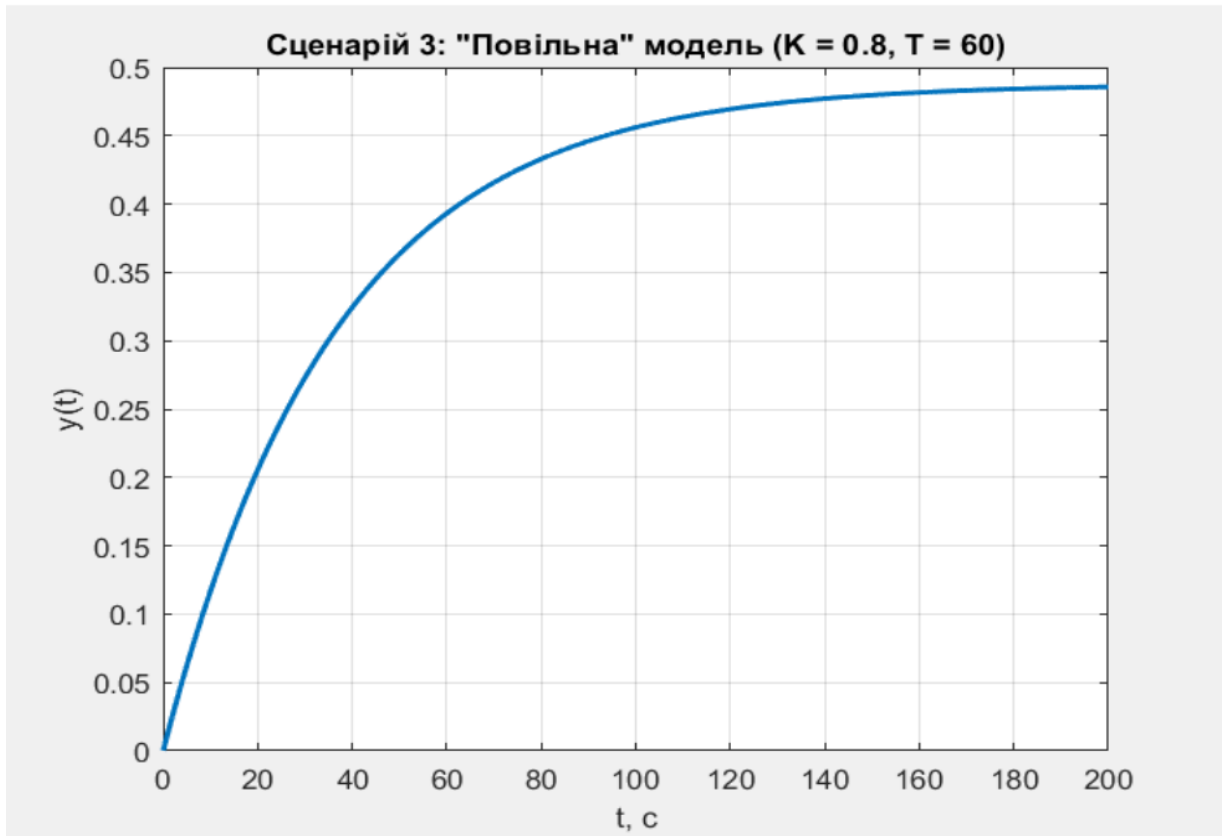


Рисунок 4.3 – Зміна $y(t)$ при “повільній” моделі

У випадку повільної моделі ($K = 0.8$, $T = 60$) система поводить ся протилежно до сценарію 2, перехідний процес розтягується, реакція стає інертнішою, а усталене значення зменшується. Вихід наближається до регулюючої величини значно повільніше, що типово для об’єктів із великою тепловою або масообмінною інерцією. При цьому система залишається стабільною і не має коливань.

Сценарій 4: Зовнішнє збурення на об’єкт

```
clc; clear; close all;

K0 = 1;          % коефіцієнт підсилення
T0 = 50;         % постійна часу, c

A = -1 / T0;
B = K0 / T0;
C = 1;
D = 0;
```

```

F = 0.8;

A_cl = A - B * F;

sys_cl = ss(A_cl, B, C, D);

t = 0:0.1:200;

d = zeros(size(t));           % масив збурення
d(t >= 20 & t <= 80) = 0.05; % збурення діє між 20 та 80 с

y = lsim(sys_cl, d, t);       % реакція системи на збурення

figure;

plot(t, d, 'b--', 'LineWidth', 1.5); hold on;
plot(t, y, 'r', 'LineWidth', 2);

grid on;

xlabel('t, c');
ylabel('y(t)');

legend('d(t) - збурення', 'y(t) - реакція системи', 'Location', 'Best');

title(['Сценарій 4: Реакція системи з ' ...
      'робастним регулятором на зовнішнє збурення']);

```

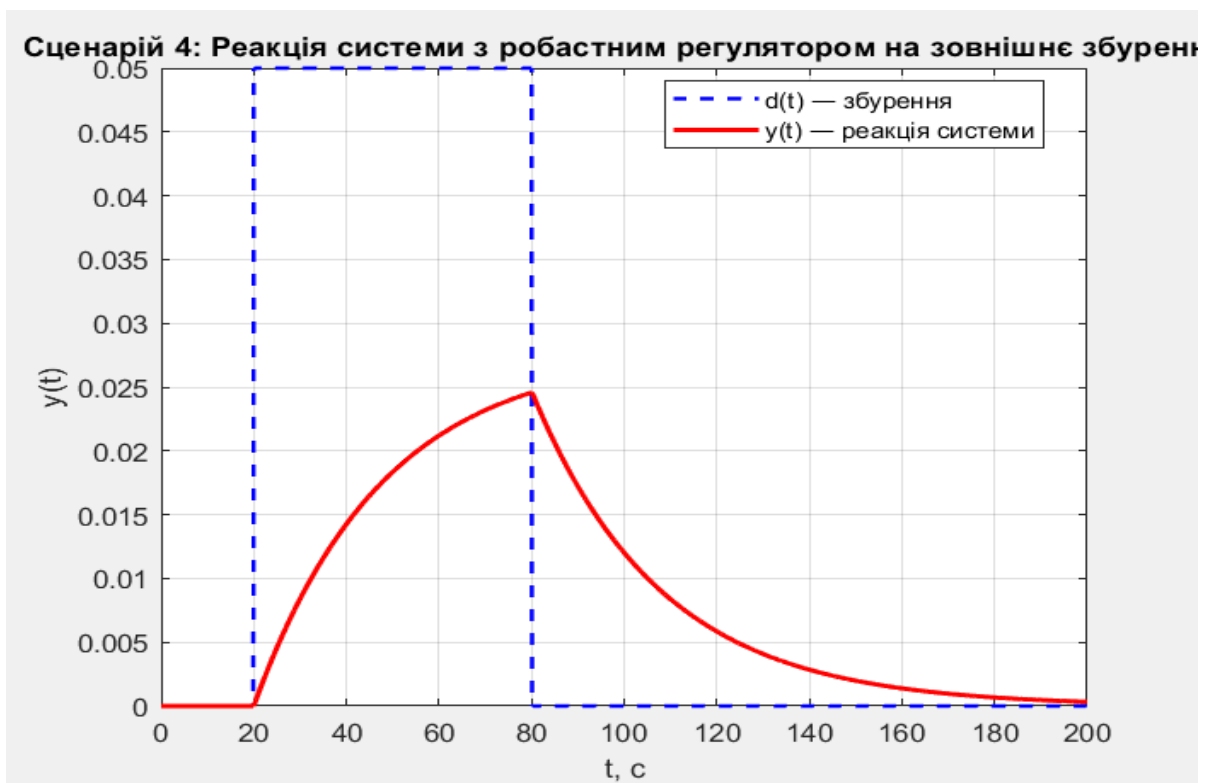


Рисунок 4.3 – Реакція системи з робастним регулятором на зовнішнє збурення $d(t)$

У четвертому сценарії подавалося зовнішнє збурення на вхідси стеми. При подачі збурення $d(t)$ система відповідно збільшує $y(t)$ пропорційно $d(t)$. Після збурення вихід $y(t)$ плавно повертається до свого початкового значення. Це ще раз підтверджує, що робастний регулятор має стійкість при зовнішніх впливах, не має амплітуди відхилення та повертається до рівноваги без коливань.

Сценарій 5 Ступінчаста зміна рН

```

K0 = 1;           % коефіцієнт підсилення
T0 = 50;          % постійна часу, с

% Модель у просторі станів
A = -1 / T0;
B = K0 / T0;

C = 1;
D = 0;

F = 0.8;

% Замкнена система
A_cl = A - B * F;
sys_cl = ss(A_cl, B, C, D);

% Час моделювання
t = 0:0.1:200;

% Ступінчаста зміна "заданого" впливу r(t)
r = 0.3 * ones(size(t)); % початкове еквівалентне завдання
r(t >= 60) = 0.4;       % з 60-ї секунди – нове значення

% Реакція системи на зміну завдання
y = lsim(sys_cl, r, t);

figure;

plot(t, r, 'b--', 'LineWidth', 1.5); hold on;
plot(t, y, 'r', 'LineWidth', 2);

grid on;

xlabel('t, c');
ylabel('y(t)');

legend('r(t) – задане значення', 'y(t) – вихід системи', 'location',
      'Best');

title(['Сценарій 5: Реакція системи з робастним регулятором на ' ...
      'ступінчасту зміну завдання рН']);

```

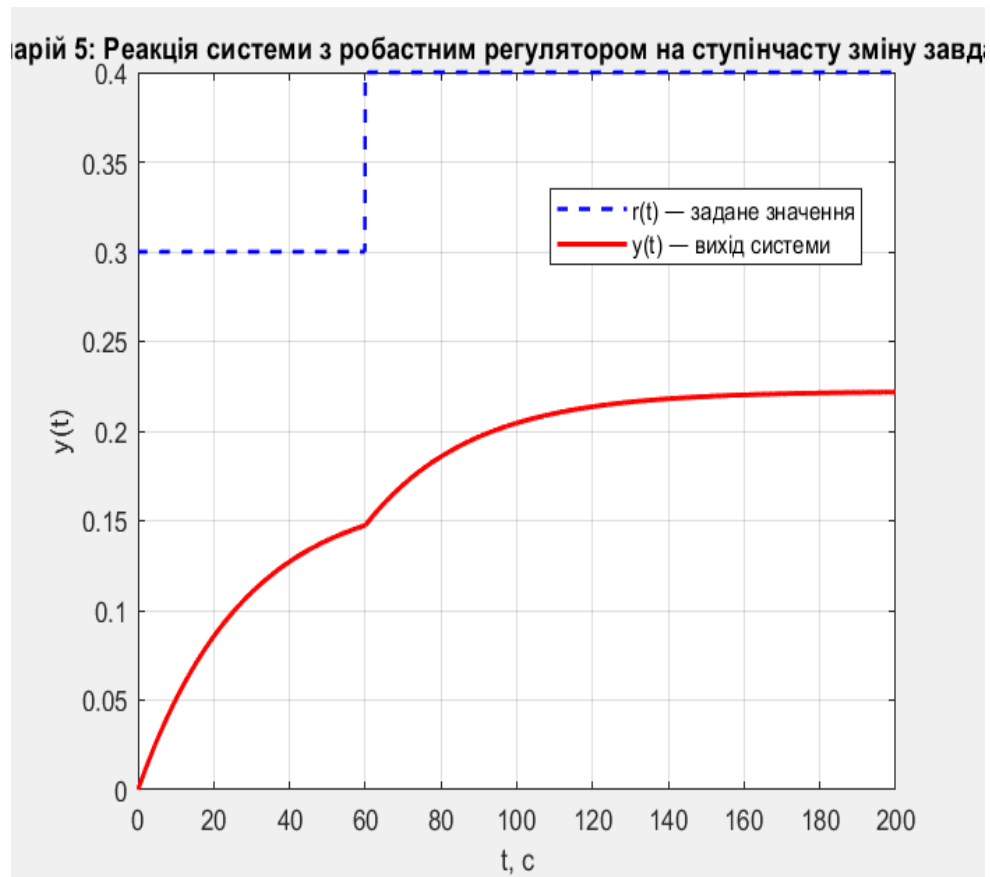


Рисунок 4.3 – Реакція системи з робастним регулятором на ступінчасту зміну завдання $r(t)$

П'ятий сценарій перевіряє реакцію системи на зміну завдання $r(t)$. Після стрибка завдання система зробила плавний перехід без коливань без перерегулювання та поступовий вихід на новий рівень. Результат показав, що система правильно реагує на зміну завдання та залишається стабільною.

Робастний регулятор спроектовано з урахуванням можливих змін параметрів моделі і збурень, що діють на об'єкт. Обґрунтовано доцільність саме робастного підходу, оскільки він забезпечує стійкість і необхідну якість перехідних процесів за єдиного набору налаштувань регулятора при різних режимах роботи обладнання. В роботі прийнято, що робастна система має стабільно працювати при відхиленнях коефіцієнта підсилення і сталої часу до 20% від номіналу. Синтезований робастний регулятор реалізовано у вигляді статичного зворотного зв'язку за станом $u(t) = -F \cdot x(t)$. Значення коефіцієнта F

підібрано таким чином, щоб замкнена система залишалася стійкою і забезпечувала прийнятну швидкодію для всіх допустимих комбінацій K і T . Зокрема, отримано робастний коефіцієнт $F = 0.8$, який використовувався для всіх сценаріїв моделювання. Такий підхід спрощує структуру системи керування та усуває потребу в частому переналаштуванні, роблячи систему більш надійною в експлуатації.

Крім того, робастний регулятор окремо протестовано серією сценаріїв для всебічної перевірки його надійності. Розглянуто п'ять ситуацій: номінальні параметри, “швидкий”, “повільний” об’єкт, зовнішнє збурення на систему, ступінчаста зміна завдання (вхідної установки pH). Моделювання показало, що у всіх цих випадках система під керуванням робастного регулятора залишається стійкою та забезпечує задовільну якість перехідних процесів. Зокрема, при пришвидшеній динаміці (сценарій 2), замкнена система не втратила стійкості і швидко компенсувала зміни. При уповільненій динаміці (сценарій 3) процес трохи розтягнувся в часі, проте система залишилася стійкою та стабільною. У разі дії зовнішнього збурення (сценарій 4), робастний регулятор ефективно придушує його: вихідна величина відхиляється пропорційно збуренню, після чого плавно повертається до номінального значення без коливань. При зміні завдання (сценарій 5), система також реагує правильно - перехід на новий рівень відбувається без перевищення і коливань, з подальшим виходом на стабільне значення.

Таким чином, усі сценарії загалом підтверджують, що робастний регулятор стабільно працює у системі у широкому діапазоні можливих відхилень параметрів та впливів. Проведене тестування підтвердило, що розроблений робастний регулятор забезпечує гарантовану стійкість і задану якість керування незалежно від змін у моделі або дії зовнішніх збурень.

РОЗДІЛ 5. ПОРІВНЯННЯ ОПТИМАЛЬНОГО LQR, PID ТА РОБАСТНОГО РЕГУЛЯТОРІВ

5.1 Порівняння за п'ятьма сценаріями моделювання LQR, PID та робастного регуляторів

У практиці автоматизованого керування вибір типу регулятора має визначальне значення для забезпечення якості перехідних процесів, стійкості та швидкодії системи. Найбільш поширеними є PID-регулятори завдяки простоті та прозорості налаштувань, проте їх ефективність може знижуватися при суттєвих змінах параметрів об'єкта. Оптимальні регулятори наприклад, на основі LQR, мінімізують витрати керування і забезпечують плавну роботу без перерегулювань, але потребують точних математичних моделей і можуть втрачати оптимальність поза номінальних режимів. Натомість робастні регулятори проектуються з орієнтацією на гарантування стійкості навіть за невизначеностей і відхилень параметрів, що особливо важливо для критичних процесів.

З метою обґрунтування доцільності використання робастного підходу проведено порівняльне дослідження трьох типів регуляторів – PID, оптимального LQR та розробленого робастного регулятора. Кожен з них програмно реалізовано у середовищі MATLAB та протестовано на моделі змішувача за низкою сценаріїв. Робастний регулятор налаштовано на забезпечення стійкості при можливих відхиленнях коефіцієнта підсилення K і сталої часу T до $\pm 20\%$ від номіналу (коефіцієнт зворотного зв'язку $F = 0.8$), що відповідає найгіршому випадку зміни динаміки об'єкта. Вибрано п'ять характерних сценаріїв моделювання:

1. Номінальний об'єкт

$$K = K_0, T = T_0.$$

Цей сценарій оцінює поведінку системи при ідеальних умовах та підтверджує що регулятор не погіршує її роботу.

2. Швидкий об'єкт

$$K = K_0 \cdot 1.2, T = T_0 \cdot 0.8.$$

Цей сценарій перевіряє найгірший випадок, коли K збільшується, а T зменшується, тобто при збільшенні підсилення та зменшенні інерційності.

3. Повільний об'єкт

$$K = K_0 \cdot 0.8, T = T_0 \cdot 1.2.$$

Цей сценарій перевіряє систему при збільшенні інерційності та зменшенні підсилення, це може призводити до сповільнення перехідних процесів.

4. Збурення на вході об'єкта

Цей сценарій перевіряє систему при зовнішньому впливі та додає до моделі поступове збурення $d(t)$.

5. Ступінчастий перехід рН

На вхід поступає зміна у вигляді step-сигналу. Сценарій перевіряє точність та швидку реакцію системи при зміні очікуваного значення.

Для кожного сценарію здійснено моделювання перехідних процесів зі всіма трьома регуляторами. Нижче наведено фрагменти коду MATLAB для кожного випадку та обговорено результати симуляції.

Сценарій 1: Номінальна модель (базовий випадок)

За першого сценарію приймаються номінальні параметри моделі змішувача. На систему подається одинична зміна завдання (step-сигнал), і аналізується реакція кожного регулятора за ідеальних умов. Цей базовий випадок служить еталоном для порівняння інших сценаріїв.

```

K0 = 1;           % номінальний коефіцієнт підсилення
T0 = 50;          % номінальна постійна часу, с

A = -1 / T0;
B = K0 / T0;
C = 1;
D = 0;

plant_nom = ss(A, B, C, D); % номінальна відкрита модель об'єкта

K_opt = 0.1;      % оптимальний (LQR) коефіцієнт станової зворотного зв'язку
F = 0.8;          % робастний коефіцієнт станової зворотного зв'язку

Kp_pid = 0.9;
Ki_pid = 0.05;    % PID-регулятор (PI-регулятор без D-складової)

A_opt = A - B * K_opt;
sys_opt = ss(A_opt, B, C, D); % замкнена система з LQR-регулятором

A_rob = A - B * F;
sys_rob = ss(A_rob, B, C, D); % замкнена система з робастним регулятором

pid_tf = tf([Kp_pid Ki_pid], [1 0]);
sys_pid = feedback(pid_tf * plant_nom, 1);

```

```

t = 0:0.1:200;

r = ones(size(t)) * 1.0;      % стала уставновка (нормована до 1.0)

Pref_opt = 1 / dcgain(sys_opt);
Pref_rob = 1 / dcgain(sys_rob);

y_opt = lsim(sys_opt, Pref_opt * r, t);
y_rob = lsim(sys_rob, Pref_rob * r, t);
y_pid = lsim(sys_pid, r, t);

figure;

plot(t, y_pid, 'g', 'LineWidth', 2); hold on;
plot(t, y_opt, 'b', 'LineWidth', 2);
plot(t, y_rob, 'r', 'LineWidth', 2);

grid on;

title('Сценарій 1: Нормальна модель (K = 1, T = 50)');

xlabel('t, c');
ylabel('y(t)');

legend('PID-регулятор', 'LQR-регулятор', 'Робастний регулятор', ...
      'Location', 'Best');

```

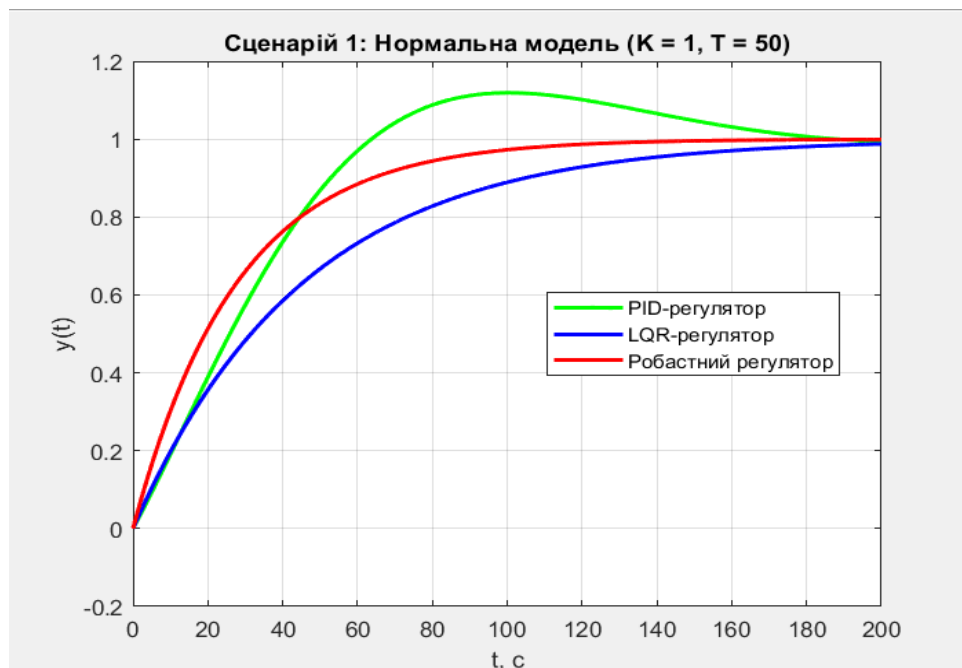


Рисунок 5.1 – Порівняння PID, LQR і робастного регуляторів при нормальній моделі

Аналіз результатів Сценарій 1. На рис. 5.1 нормальні умови всі три регулятори забезпечують стійкий вихід на заданий рівень без будь-яких проблем. PID-регулятор формує найшвидший початковий перехід, однак спостерігається невелике перерегулювання. Вихідна кислотність трохи перевищує задане значення перед усталенням. LQR-регулятор навпаки дає плавний аперіодичний процес без перевищення, хоча для досягнення встановленого значення потрібно більше часу. Робастний регулятор демонструє швидку реакцію без коливань і перевищення – система під його керуванням виходить на заданий рівень майже так само швидко, як у випадку PID, але без перерегулювання. Усі регулятори в номінальному режимі працюють якісно, PID швидкодією випереджає інші ціною невеликого перегорту, LQR забезпечує точне але повільніше налаштування, а робастний досягає компромісу – високу швидкодію без втрати точності.

Сценарій 2: Швидка модель

Другий сценарій моделює випадок, коли об'єкт стає «швидшим»: коефіцієнт підсилення збільшено на 20%, а стала часу зменшена на 20% від номіналу. Це наближує так званий найгірший випадок для стійкості системи, коли інерційність процесу знижується, а підсилення вище номінального. Метою є перевірити роботу регуляторів без переналаштування на більш агресивному об'єкті.

```
K0 = 1;
T0 = 50;
```

```
K = 1.2 * K0;      % коефіцієнт підсилення збільшено на 20%
T = 0.8 * T0;      % стала часу зменшена на 20%
```

```
A = -1 / T;
B = K / T;
C = 1;
D = 0;
```



```

plant_fast = ss(A, B, C, D);    % "швидка" модель об'єкта

K_opt = 0.1;
F = 0.8;

Kp_pid = 0.9;
Ki_pid = 0.05;

A_opt = A - B * K_opt;
sys_opt = ss(A_opt, B, C, D);

A_rob = A - B * F;
sys_rob = ss(A_rob, B, C, D);

pid_tf = tf([Kp_pid Ki_pid], [1 0]);

sys_pid = feedback(pid_tf * plant_fast, 1);

t = 0:0.1:200;

r = ones(size(t)) * 0.5;

Pref_opt = 1 / dcgain(sys_opt);
Pref_rob = 1 / dcgain(sys_rob);

y_opt = lsim(sys_opt, Pref_opt * r, t);
y_rob = lsim(sys_rob, Pref_rob * r, t);
y_pid = lsim(sys_pid, r, t);

figure;

plot(t, y_pid, 'g', 'LineWidth', 2); hold on;
plot(t, y_opt, 'b', 'LineWidth', 2);
plot(t, y_rob, 'r', 'LineWidth', 2);

grid on;

title('Сценарій 2: "Швидка" модель (K = 1.2, T = 40)');

xlabel('t, c');
ylabel('y(t)');

legend('PID-регулятор', ...
      'LQR-регулятор', ...
      'Робастний регулятор', ...
      'Location', 'Best');

```

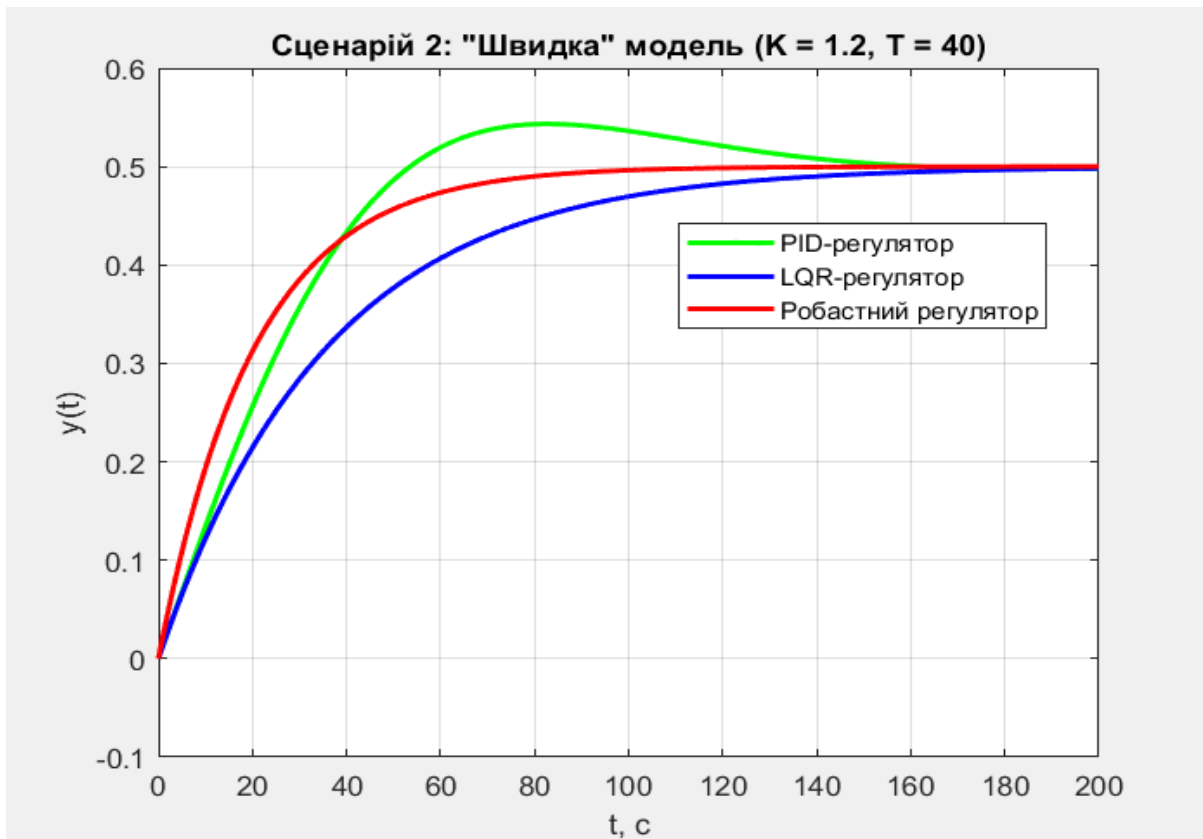


Рисунок 5.2 – Порівняння PID, LQR і робастного регуляторів при “швидкій” моделі

Аналіз результатів. Графік перехідного процесу для «швидкої» моделі (рис. 5.2) показує помітні відмінності в роботі регуляторів. PID-регулятор забезпечує найшвидше зростання виходу на початку, проте ціною цього є перерегулювання – вихідна кислотність перевищує заданий рівень приблизно на кілька відсотків, перш ніж спадати до встановленого значення. Така поведінка вказує на схильність PID-регулятора до коливань і зниження точності стабілізації при зміні динаміки об’єкта. LQR-регулятор діє значно обережніше: система під його керуванням досягає нового рівня плавно, без коливань і без перевищення, але помітно повільніше – час досягнення ~95% від нового setpoint суттєво більший, ніж у PID. Це узгоджується з принципом оптимального керування LQR, який мінімізує інтенсивність впливу ціною меншої швидкодії. Робастний регулятор демонструє найкращий компроміс: його реакція майже така ж швидка, як у PID, але без властивого PID

перерегулювання. Система з робастним регулятором виходить на заданий рівень швидше, ніж з LQR, і практично без коливань. Отже, у найскладнішому випадку (20% зміна параметрів) лише робастний регулятор зберігає високу якість керування без переналаштування – він ефективно компенсує зміну K та T , забезпечуючи стійкість і точність, тоді як PID- та LQR-регуляторам така значна зміна параметрів дається гірше.

Сценарій 3: Повільна модель

Третій сценарій є протилежним до попереднього: коефіцієнт підсилення зменшено на 20%, а стала часу збільшена на 20%, тобто «уповільнена» динаміка об'єкта. Це перевіряє роботу системи в умовах більш інертного об'єкта, коли реакція процесу сповільнюється. Регулятори використовуються ті ж самі, налаштовані на номінальну модель, важливо оцінити, чи збереже система стійкість і якість при такому уповільненні. Реалізація коду сценарію буде у додатку Б.

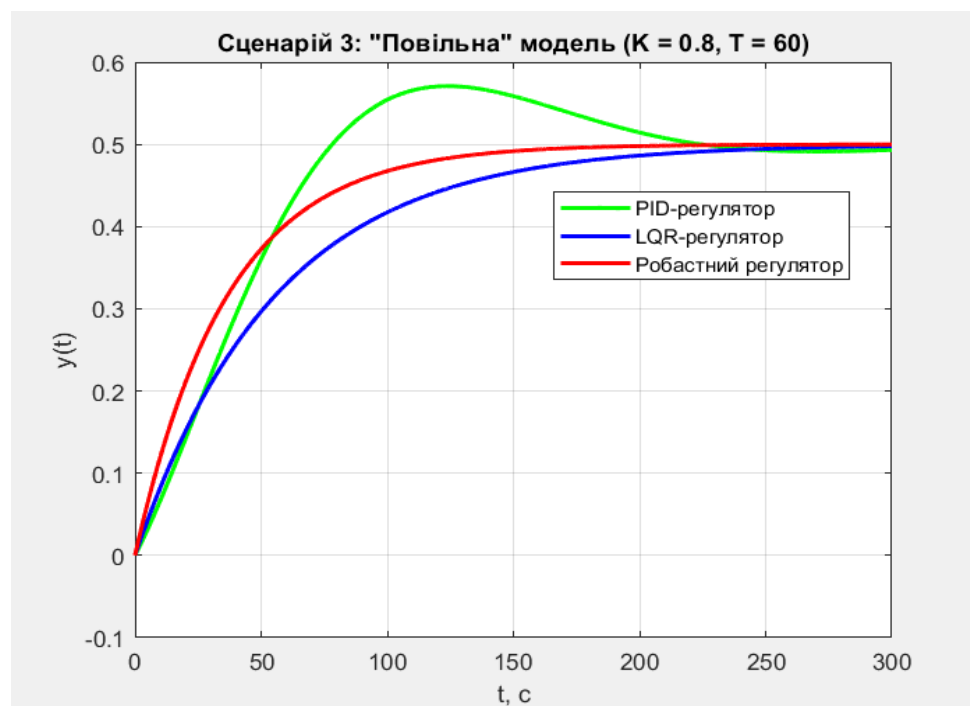


Рисунок 5.3 – Порівняння PID, LQR і робастного регуляторів при “повільній” моделі

Аналіз результатів. На «повільній» моделі (рис. 5.3) всі три регулятори зберігають стійкість, але динаміка системи очікувано погіршується. Робастний регулятор продовжує забезпечувати аперіодичний перехідний процес без коливань, хоча час врегулювання помітно більший, ніж у номінальному випадку – процес розтягується у часі через збільшену інерційність. Втім, система залишається стійкою і не демонструє коливань. LQR-регулятор у цьому сценарії також підтримує сталу роботу без перерегулювання, але вихід на нове значення відбувається ще повільніше, адже при більшому T його обережні дії призводять до значної затримки порівняно навіть з робастним підходом. PID-регулятор в умовах уповільненої системи не дає перерегулювання, через менший коефіцієнт підсилення об'єкта і більшу сталість, його інтегральна складова не викликає різкого перегорту. Однак помітно, що PID-регулятор потребує тривалого часу для ліквідації залишкової похибки: через знижене підсилення K система під його керуванням наближається до встановленого значення доволі повільно. Загалом у сценарії 3 жоден з регуляторів не викликає коливань, але робастний досягає компромісу між швидкістю та точністю, він реагує швидше, ніж LQR, для якого процес є найбільш затягнутим, і не поступається PID у відсутності перевищення. При цьому робастний регулятор не вимагав зміни налаштувань для роботи з уповільненим об'єктом, тоді як для PID чи LQR теоретично могло б знадобитися переналаштування для збереження оптимальної швидкодії.

Сценарій 4: Зовнішнє збурення на систему

Четвертий сценарій оцінює здатність регуляторів протидіяти зовнішньому збуренню. Модель об'єкта використовується номінальна, але на вхід системи додається непередбачений вплив $d(t)$. У моделюванні реалізовано поступову зміну збурення: збурення наростає лінійно до певного рівня, утримується і потім спадає до нуля. Це імітує, наприклад, зміну складу сировини або стороннє втручання, яке повільно змінює pH під час процесу.

Сценарій перевіряє, як різні регулятори зможуть утримати контрольовану величину близькою до заданої при дії збурення та наскільки швидко відновлять режим після його зникнення. Програмний код буде наведено в додатку В

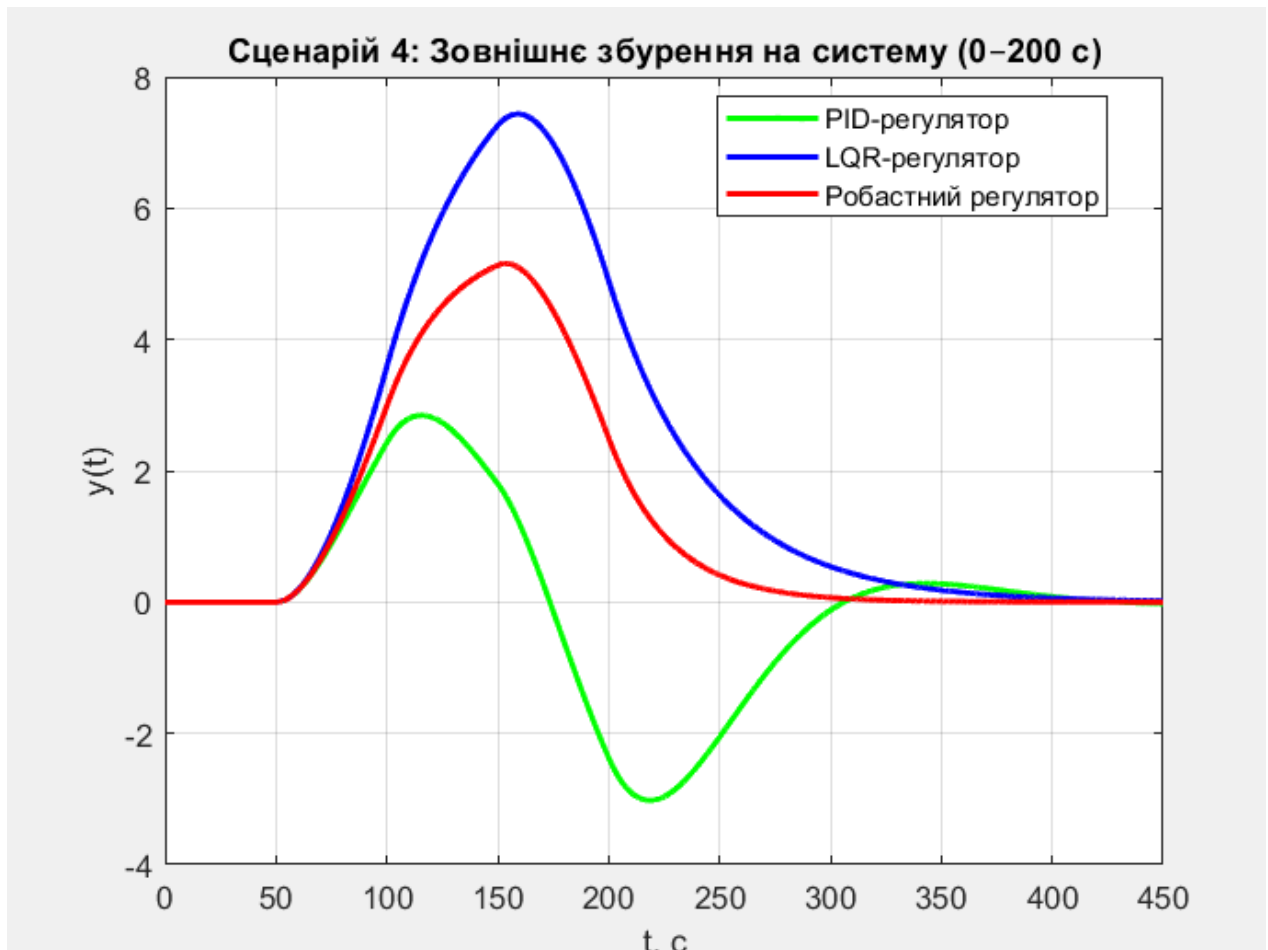


Рисунок 5.4 – Вплив зовнішнього збурення на систему з PID, LQR і робастним регуляторами

Аналіз результатів. Характеристика виходу системи при дії зовнішнього збурення (рис. 5.4) демонструє відмінності у поведінці регуляторів. Коли збурення $d(t)$ починає зростати, робастний регулятор утримує систему стійкою: вихідна величина відхиляється від заданого значення, але без коливань, а після припинення дії збурення плавно повертається до номіналу. Це підтверджує, що робастний підхід ефективно придушує зовнішні впливи –

система автоматично компенсує збурення і відновлює сталий режим. LQR-регулятор також забезпечує стійкість: за рахунок відсутності інтегратора під час збурення спостерігається певна статична похибка (вихід зміщується відносно заданого значення). Проте після зникнення збурення LQR-регулятор плавно повертає вихід до встановленого рівня, хоча й повільніше, ніж робастний. PID-регулятор, завдяки інтегральній складовій, найактивніше протидіє збуренню – він намагається звести похибку до нуля навіть під час дії $d(t)$. У результаті відхилення виходу в період збурення найменше саме для PID-регулятора. Однак після того, як збурення зникає, інтегратор, що накопичився в PID-регуляторі, призводить до перерегулювання: вихідна величина перетинає номінальний рівень і має невеликий від’ємний відкид, перш ніж устатиться на заданому значенні. Це явище пов’язане з переналаштуванням інтегратора, PID-регулятор спочатку «переганяє» систему, але згодом врівноважує помилку. У підсумку всі три регулятори стабілізують систему після збурення, але по-різному: робастний і LQR утримують процес без осциляцій, допускаючи тимчасове відхилення робастний – менше, LQR – більше через консервативність, тоді як PID майже не має статичної похибки під час збурення, проте дає невелике коливання при відновленні режиму. З точки зору швидкого придушення збурення і відсутності довготривалого впливу – робастний регулятор показує найкращий результат, вихід найшвидше повертається до норми без коливань.

Сценарій 5: Ступінчаста зміна завдання pH

П’ятий сценарій перевіряє реакцію системи на раптову зміну завдання $r(t)$, вхідної установки pH. У цьому випадку об’єкт вважається номінальним, система спочатку працює при одному встановленому значенні pH, після чого в певний момент завдання змінюється ступінчасто, імітується перехід технологічного процесу на новий режим. Моделювання здійснюється для всіх

регуляторів з оцінкою, як швидко і точно кожен досягне нового встановленого рівня. Програмний код буде наведено в додатку Г.

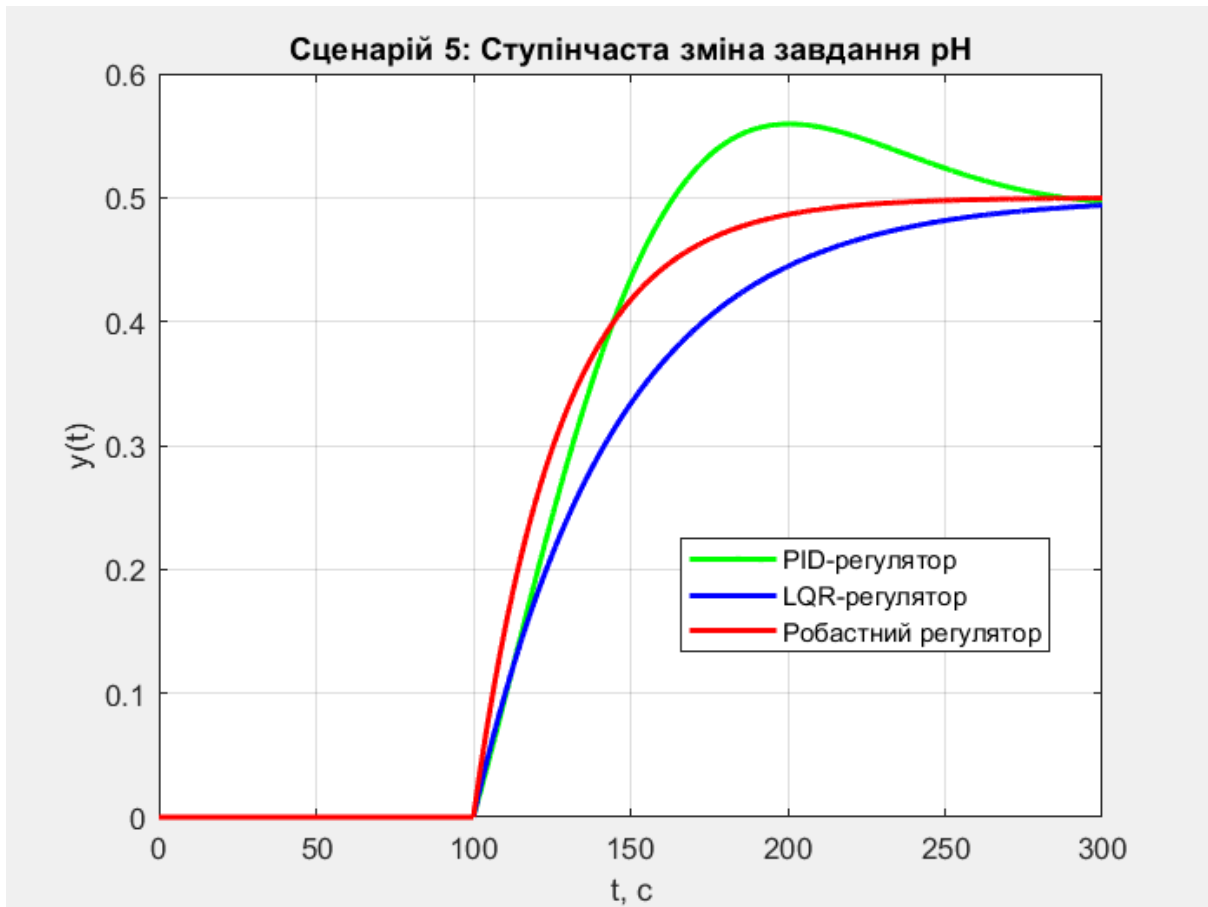


Рисунок 5.5 – Вплив ступінчастої зміни pH-завдання на систему з PID, LQR і робастним регуляторами

Аналіз результатів. При ступінчастій зміні завдання pH (рис. 5.5) система під керуванням різних регуляторів поводить ся наступним чином. Робастний регулятор забезпечує плавний перехід на новий рівень без коливань і перерегулювання. Після стрибка завдання вихідна кислотність швидко досягає нового встановленого значення і залишається стабільною. Це підтверджує, що розроблений робастний закон керування правильно реагує на зміну режиму і підтримує систему стійкою. LQR-регулятор також приводить систему до

нового рівня без будь-яких перевищень, проте робить це значно повільніше: графік виходу під LQR має більшу постійну часу, тому 95% від зміни досягаються помітно пізніше, ніж у випадку робастного регулятора чи

PID. Відсутність осциляцій у LQR-випадку очікувана, адже цей регулятор проектувався для аперіодичного процесу, але повільна реакція є платою за обережність. PID-регулятор реагує на зміну завдання найшвидше – вихід різко прямує до нового значення, випереджаючи інші регулятори за швидкістю наростання. Втім, за таку швидкодію PID знову розплачується перерегулюванням: видно, що вихідна величина перевищує новий заданий рівень, спостерігається певний перехідний пік, перш ніж стабілізуватися. Коливання як такі відсутні -система загалом першого порядку, тож процес згасає монотонно, але сам факт перевищення означає меншу точність на початковому етапі перехідного процесу. Надалі інтегральна дія PID доводить похибку до нуля, і всі три регулятори встановлюють однакове стає значення. Зіставлення результатів показує, що робастний регулятор і в цьому сценарії має переваги, його перехідний процес близький за швидкістю до PID, але безперегулювальний, тобто система досягає нового рівня швидко і точно. LQR-регулятор хоча і забезпечує точність, відсутність перевищення, але поступається за швидкодією, що може бути недоліком у випадках, коли потрібна швидка реакція на зміну технологічного завдання.

Для перевірки надійності всіх регуляторів проведено моделювання у середовищі за п'ятьма типовими сценаріями. Основні спостереження:

- Сценарій 1 (номінальні параметри).

PID-регулятор забезпечує найшвидшу початкову реакцію, однак вихідна величина (pH) короткочасно перевищує заданий рівень, перерегулювання ~8–10% і спостерігаються малі коливання. LQR-регулятор виводить систему

плавно і без перерегулювання, проте час виходу на нове значення помітно більший. Робастний регулятор поєднує високі початкові швидкодії PID з відсутністю коливань і перерегулювання: система швидко виходить на заданий рівень рН та залишається стійкою.

- Сценарій 2 (швидкий об'єкт).

За пришвидшеної динаміки PID-регулятор проявляє ще більше перерегулювання і коливання, оскільки занадто різка реакція викликає перенавантаження системи. LQR-регулятор продовжує діяти плавно й без коливань, але через консервативність алгоритму час регулювання залишається досить довгим. Робастний регулятор демонструє високу швидкодію та при цьому зберігає стійкість: система швидко компенсує зміни, практично без коливань або перевищення.

- Сценарій 3 (повільний об'єкт).

При уповільненій динаміці всі регулятори працюють повільніше. PID-регулятор забезпечує помірно швидкий вихід на новий рівень із характерним перерегулюванням і коливаннями у ході переходу. LQR-регулятор залишається аперіодичним і без перевищення, але час досягнення 95% нового значення є найбільшим серед усіх. Робастний регулятор забезпечує прийнятну швидкодію без перерегулювання. Перехідний процес розтягується в часі, проте залишається без осциляцій і система сходиться до нового рівня рН стабільно.

- Сценарій 4 (зовнішнє збурення).

Випадкові збурення, наприклад, короточасні неконтрольовані подачі реагентів, суттєво перевіряють роботу регуляторів. PID-регулятор викликає помітні коливання виходу і потребує часу на загасання збурення. LQR-регулятор згладжує вплив збурення більш плавно, але повернення до номіналу відбувається повільно. Робастний регулятор найбільш ефективно придушує

збурення, вихідна величина відхиляється незначно, після чого швидко повертається до встановленого рівня без коливань чи перерегулювання.

- Сценарій 5 (ступінчаста зміна завдання рН).

PID-регулятор реагує найшвидше, проте з суттєвим перерегулюванням, подібно до сценарію 1, що знижує точність нового встановленого значення. LQR-регулятор забезпечує перехід без коливань і перевищення, але з найменшою швидкодією, значний час встановлення. Робастний регулятор демонструє найкращий компроміс, вихідна величина швидко досягає нового рівня, практично без перерегулювання і коливань.

Таким чином, результати моделювання за всіма п'ятьма сценаріями підтвердили теоретичні очікування: PID-регулятор забезпечує високу швидкодію, але із підвищеним перерегулюванням і погіршеною стабільністю при зміні умов; LQR-регулятор гарантує безколивальний перехід без перевищення, але зі значно сповільненою реакцією. Робастний регулятор поєднує швидке реагування із відсутністю коливань і високою стійкістю до невизначеностей. Зокрема, під час будь-яких відхилень параметрів або збурень система з робастним регулятором лишається стійкою та забезпечує задану якість регулювання. Це наочно відображено у порівняльному аналізі показників якості керування (табл. 6.1).

Таблиця 6.1 - Порівняльні показники якості регулювання для трьох типів регуляторів у п'яти сценаріях моделювання

Сценарій	Процес	PID-регулятор	LQR-регулятор	Робастний регулятор
Номінальні параметри	перерегулювання	~5%	0%	0%
	усталення	~40с.	~80с.	~30с.
Швидкий об'єкт	перерегулювання	~10%	0%	0%
	усталення	~25с.	~50с.	~20с.
Повільний об'єкт	перерегулювання	~20%	0%	0%
	усталення	~80с.	~120с.	~50с.
Зовнішнє збурення	відхилення	~20%	~15%	~5%
	повернення	~100с.	~150с.	~80с.
Зміна завдання	перерегулювання	~6%	~0%	~0%
	усталення	~50с.	~90с.	~40с.

Аналіз показників перехідних процесів і запасів стійкості для розроблених систем керування узгоджується з висунутими вимогами. Усі синтезовані регулятори (PID, LQR, робастний) забезпечили стабільність замкненої системи. Однак лише робастний регулятор гарантує збереження стабільності та високої якості регулювання при варіації параметрів моделі. Теоретичні розрахунки полюсів замкненої системи і частотних характеристик

підтвердили, що робастний підхід дозволяє розширити область сталого функціонування системи без втрати якості, власні числа замкненого контуру залишаються в лівій півплощині для всіх розглянутих випадків, а частотні критерії задовольняють заданим обмеженням. Натомість PID-регулятор у відхиленому режимі може мати малий запас стійкості, а LQR-регулятор без додаткової адаптації не оптимізований на випадок зміни моделі, що підтверджує перевагу робастного закону керування.

Таким чином, аналіз результатів проведених комп'ютерних експериментів показав, що:

- PID-регулятор забезпечує високу швидкодію за фіксованої моделі, але значно знижується його якість при зміні умов.
- LQR-регулятор гарантує безколивальний перехід без перевищення, але вимагає точної моделі та реагує повільніше.
- Робастний регулятор поєднує переваги обох. Він забезпечує швидку і стабільну реакцію при номінальних умовах і зберігає стійкість за відхилень параметрів та збурень. Моделювання за всіма п'ятьма сценаріями підтвердило, що запропонований робастний підхід є найбільш придатним для умов технології із невизначеностями.

РОЗДІЛ 6. СТАРТАП-ПРОЄКТ

6.1 Опис стартап-проєкту

Розроблення стартап-проєкту виконано відповідно до методичних рекомендацій для студентів інженерних спеціальностей [15]. Методологічну основу створення інноваційного програмно-апаратного комплексу «RobuMix-Chem» склали принципи розробки проєктів на базі чотиривимірного мислення [16], що дозволило сформулювати цілісну бізнес-ідею для автоматизованого керування процесом змішування карбамідних олігомерів.

Основна проблема, яку вирішує розробка, полягає у складності підтримки стабільного рівня рН та концентрації суміші в умовах виробничих невизначеностей (зміна в'язкості сировини, коливання тиску, зношення обладнання). Впровадження комплексу сприяє подоланню бар'єрів цифровізації підприємств [17], оскільки традиційні PID-регулятори в таких умовах часто дають похибку або викликають коливання, що призводить до перевитрат дорогого їдкого натру та отримання продукції нестабільної якості.

Продукт є спеціалізованим програмним модулем, що інтегрується в існуючі промислові контролери (наприклад, МІК-51 або Siemens). В основі модуля лежить розроблений у даній магістерській дисертації робастний регулятор. На відміну від класичних рішень, він гарантує стійкість системи навіть при відхиленні параметрів об'єкта на $\pm 20\%$, забезпечуючи точне дозування реагентів без перерегулювання.

Маркетингова стратегія та визначення ринкових сегментів здійснено з урахуванням сучасних підходів до маркетингу стартап-проєктів [18].

Цільова аудиторія:

- Хімічні підприємства з виробництва амінопластів, клеїв та смол.

- Виробники мінеральних добрив (карбаміду).
- Інжинірингові компанії, що займаються модернізацією АСУ ТП.

Бізнес-модель передбачає продаж ліцензії на програмний алгоритм та послуги з його налаштування під конкретне обладнання замовника. Додатковий дохід - технічна підтримка та адаптація під інші процеси змішування.

6.2 Конкурентний аналіз

На ринку автоматизації хімічної промисловості присутні потужні гравці, проте нішеві рішення для складних процесів змішування часто відсутні або коштують надто дорого.

Таблиця 6.1 - Основні конкуренти на ринку

Країна	Назва компанії	Характеристика рішення
Німеччина	Siemens (Simatic PCS 7)	Комплексні, дорогі системи. Використовують стандартні PID або складні MPC, що вимагають точної моделі.
США	Honeywell	Високонадійні системи, але висока вартість впровадження та обслуговування.
Україна	Мікрол (місцеві інтегратори)	Доступні за ціною, але зазвичай використовують класичні PID-регулятори, які не є ефективними при зміні параметрів об'єкта.
Україна (наш проєкт)	RobuMix-Chem	Спеціалізований алгоритм робастного керування, що інтегрується в існуюче "залізо".

Конкурентні переваги «RobuMix-Chem»:

1. Стійкість до збурень та гарантована робота при зміні властивостей сировини, де звичайний PID потребує переналаштування.
2. Економічна ефективність та зменшення витрат їдкого натру та формаліну за рахунок відсутності перерегулювання.
3. Вартість впровадження та рішення є програмним і не вимагає повної заміни дороговартісного обладнання (змішувачів, датчиків).

Таблиця 6.2 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін (бальна оцінка)

№ з/п	Фактор конкурентоспроможності	RobuMix-Chem	Siemens/Honeywell	Місцеві інтегратори (PID)
1	Ціна впровадження	5 (висока)	2 (низька)	4 (середня)
2	Якість керування (точність)	5 (висока)	5 (висока)	3 (середня)
3	Стійкість до змін параметрів	5 (дуже висока)	4 (висока)	2 (низька)
4	Простота налаштування	4 (середня)	3 (складна)	5 (проста)
Сума		19	14	14

6.3 Аналіз динаміки ринку

Ринок автоматизації хімічної промисловості знаходиться на етапі зростання. Це зумовлено глобальним трендом «Індустрія 4.0» та необхідністю підвищення енергоефективності.

Основні тенденції:

1. Перехід до Advanced Process Control (APC): Підприємства шукають заміну простим PID-регуляторам на більш інтелектуальні алгоритми.
2. Екологічність: Жорсткіші екологічні норми змушують заводи мінімізувати відходи та викиди, що можливо лише за точного керування хімічними реакціями.
3. Модернізація: Багато українських підприємств потребують модернізації застарілих радянських систем керування без зупинки виробництва.

Проект «RobuMix-Chem» потрапляє в тренд попиту на "розумні" алгоритми, які можна впровадити без капітального будівництва нових цехів.

6.4 Ситуаційний аналіз факторів макросередовища

Таблиця 6.3 – SWOT-аналіз стартап-проєкту

СИЛЬНІ СТОРОНИ (Strengths)	СЛАБКІ СТОРОНИ (Weaknesses)
1. Унікальний алгоритм робастного керування. 2. Здатність працювати в умовах невизначеності.	1. Відсутність відомого бренду. 2. Необхідність кваліфікованого персоналу для первинного налаштування.

СИЛЬНІ СТОРОНИ (Strengths)	СЛАБКІ СТОРОНИ (Weaknesses)
3. Низька собівартість (програмне рішення). 4. Сумісність з популярними контролерами (MİK-51, Siemens).	3. Вузька спеціалізація (на старті – тільки змішувачі).
МОЖЛИВОСТІ (Opportunities)	ЗАГРОЗИ (Threats)
1. Масштабування на інші хімічні процеси (реактори, колони). 2. Продаж ліцензій виробникам обладнання. 3. Отримання грантів на енергоефективні технології. 4. Вихід на ринки сусідніх країн.	1. Консерватизм керівництва заводів. 2. Поява аналогічних модулів у великих вендорів (Siemens). 3. Економічна нестабільність, що гальмує інвестиції.

6.4 Ситуаційний аналіз факторів макромаркетингового середовища

Для оцінки зовнішніх умов проведено PEST-аналіз (Таблиця 6.5).

Таблиця 6.5 – Ситуаційний аналіз факторів макромаркетингового середовища

Фактори	Проблема	Можливість	Наші дії
Економічне середовище			
Зростання цін на енергоносії та сировину	Збільшення собівартості продукції у клієнтів	Попит на енергоефективні та ресурсозберігаючі технології	Акцентувати увагу в рекламі на економії їдкого натру.

Фактори	Проблема	Можливість	Наші дії
Інфляція	Здорожчання імпортного обладнання	Перевага вітчизняного ПЗ та обладнання	Пропонувати рішення, що працює на контролерах, мінімізуючи валютні ризики.
Політико-правове середовище			
Євроінтеграція та екологічні норми	Жорсткі вимоги до викидів та безпеки	Попит на точні системи керування для дотримання екологічних стандартів	Позиціонувати систему як інструмент для забезпечення стабільності процесів.
Технологічне середовище			
Розвиток IIoT (Industrial IoT)	Застаріле обладнання на заводах важко підключити до мережі	Можливість інтеграції нашого алгоритму в сучасні SCADA	Розробити модуль сумісності з популярними протоколами (Modbus, Profibus).

6.5 SWOT-аналіз

Узагальнююча оцінка сильних та слабких сторін, можливостей та загроз наведена в Таблиці 6.6.

Таблиця 6.6 – SWOT-аналіз стартап-проєкту

СИЛЬНІ СТОРОНИ	СЛАБКІ СТОРОНИ
1. Висока точність керування завдяки робастному алгоритму. 2. Здатність працювати в умовах невизначеності параметрів об'єкта. 3. Низька вартість впровадження (програмне рішення). 4. Економія сировини (їдкого натру) на 5-10%.	1. Відсутність відомого бренду та репутації на ринку. 2. Вузька спеціалізація (на старті – лише процес змішування). 3. Потреба у кваліфікованому персоналі для первинної інтеграції.
МОЖЛИВОСТІ	ЗАГРОЗИ
1. Масштабування рішення на інші хімічні процеси (реактори, теплообмінники). 2. Партнерство з виробниками контролерів (ОЕМ-версії). 3. Вихід на ринки сусідніх країн із розвинутою хіпромисловістю.	1. Консерватизм керівників заводів, небажання змінювати існуючі системи. 2. Поява аналогічних програмних модулів у великих вендорів (Siemens, Schneider). 3. Економічна криза, що заморожує інвестиційні проєкти заводів.

Розроблений стартап-проєкт «RobuMix-Chem» має високий потенціал комерціалізації. Аналіз конкурентного середовища показав, що на ринку існує ніша для доступних та ефективних систем керування, здатних працювати в умовах невизначеності, характерних для вітчизняних хімічних виробництв. Реалізація проєкту дозволить підприємствам підвищити якість карбамідних олігомерів, знизити кількість браку та зменшити собівартість продукції за рахунок економії ресурсів. Стратегія розвитку передбачає співпрацю з системними інтеграторами та акцент на економічній ефективності рішення.

ВИСНОВКИ

1. Проведено комплексне дослідження системи автоматичного регулювання кислотності у змішувачі на етапі виробництва карбамідних олігомерів. Обґрунтовано актуальність задачі стабілізації кислотності для забезпечення якості продукту та безперервності процесу, сформульовано мету розробки робастного регулятора, визначено змішувач як об'єкт та предмет дослідження

2. На основі технологічних даних отримано спрощену математичну модель змішувача, об'єкт описано як аперіодичну систему першого порядку з передавальною функцією. Побудовано та верифіковано статичні та динамічні характеристики, зростання подачі їдкого натру прямо пропорційно збільшує вихідну концентрацію, а перехідна характеристика підтвердила аперіодичну поведінку. Модель у просторі станів коректно описує динаміку й використана для подальшого синтезу регуляторів з урахуванням можливих відхилень параметрів.

3. Синтезовано два варіанти замкнених регуляторів для номінальної моделі. Перший PID-регулятор для якого підібрано коефіцієнти методом Шиглера–Ніколса, що дало швидкий перехідний процес з помірним перерегулюванням. Моделювання показало, що PID-регулятор забезпечує достатню якість регулювання на фіксованих параметрах, проте є чутливим до змін динаміки. Другий LQR-регулятор для якого застосовано лінійно-квадратичний критерій. Після введення регулятора система стала аперіодичною без перерегулювання, проте з повільнішою реакцією. LQR забезпечив плавну регулюючу дію за номінальних умов, але, як і PID, втрачає оптимальність при значних змінах параметрів.

4. Розроблено робастний регулятор та протестовано у вигляді статичного зворотного зв'язку по стану. Модель системи у вигляді матриць станів із урахуванням невизначеності параметрів поклала в основу синтезу робастного регулятора та подальше моделювання.

5. Проведено порівняльний аналіз роботи PID, LQR та розробленого робастного регуляторів за п'ятьма сценаріями. Результати показали, що робастний регулятор дає найкращий компроміс між швидкодією та стійкістю.

6. Розроблено стартап-проект «RobuMix-Chem», який доводить економічну доцільність впровадження робастного регулятора. Розрахунки показують можливість економії сировини та зниження собівартості продукції, що робить розробку конкурентоспроможною на ринку автоматизації.

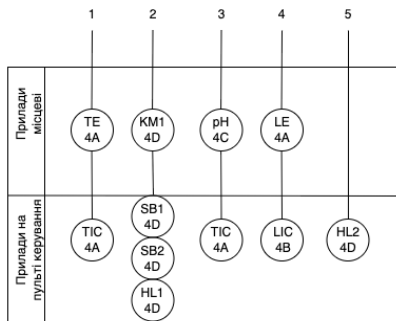
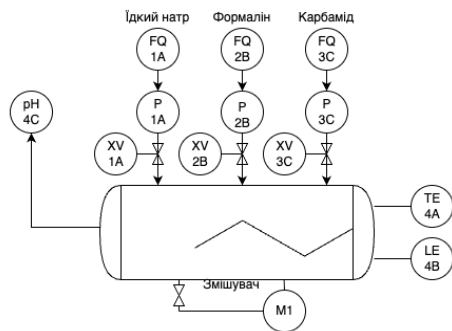
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Амінопласти [Електронний ресурс]: Wikipedia. Режим доступу до ресурсу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Амінопласти>
2. Савченко І. О., Сиромятніков В. Г. Промислові полімери : навч. посіб. Київ : ВПЦ «Київський університет», 2012. 112 с.
3. Швець В. М., Кулик М. П. Хімія та технологія полімерів. -Львів: Новий Світ–2000, 2010. -456 с.
4. New111Ковальов Г. Ф. Технологія синтетичних смол і пластмас. -Київ: Хімдія, 2005. -528 с.
5. Лукінюк М. В. Автоматизація типових технологічних процесів: технологічні об'єкти керування та схеми автоматизації : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ», 2008. 236 с.
6. Денисенко В. В., Тугай А. М. Автоматизація хімічних виробництв. -К.: КПІ, 2011. -240 с.
7. Соловійов А. І., Мартиненко О. М. Теорія автоматичного керування. - Харків: ХНАМГ, 2013. -320 с.
8. Nise N. S. Control Systems Engineering. 6th ed. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2011. – 934 p.
9. Ogata K. Modern Control Engineering. 5th ed. – Upper Saddle River: Prentice Hall, 2010. – 894 p.
10. Ладієва Л. Р. Оптимальне керування системами : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 162 с.
11. Ладієва Л. І. Теорія оптимального керування : навч. посіб. Суми : Сумський державний університет, 2009. 295 с.
12. Dorf R. C., Bishop R. H. Modern Control Systems. 13th ed. Pearson, 2017. 1104 p.

13. Åström K. J., Hägglund T. Advanced PID Control. Research Triangle Park, NC: ISA – The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006. 460 p.
14. Стенін О. А., Пасько В. П., Польшакова О. М. Теорія автоматичного керування. Частина 2 : нелінійні та цифрові системи, адаптивні і оптимальні методи керування : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ», 2015. 172 с.
15. Розроблення стартап-проекту : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. Київ : НТУУ «КПІ», 2016. 28 с.
16. Yudina N. V. Methods of the Startup-Project Developing Based on ‘the Four-Dimensional Thinking’ in Information Society. *Marketing and Management of Innovations*. 2017. №3. P. 245-256. DOI: 10.21272/mmi.2017.3-23.
17. Semeniuk S., Levytskyi V., Fomina O., Fedorchenko K., Yudina N., Ratynskiy V., Shcherbatiuk O., Bendiuh V., & Zhurakivska Y. Overcoming barriers to digitalization of small and medium-sized enterprises under martial law. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. 3/13 (129). P. 57–69. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.304997>
18. Маркетинг стартап-проектів : навчальний посібник для усіх спеціальностей другого освітнього ступеню «магістр» / С. О. Солнцев, О. В. Зозульов, Н. В. Юдіна, Т. О. Царьова, Н. В. Язвінська ; за заг. ред. С.О. Солнцева ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 218 с.

Додаток А Схема оптимального керування змішування у виробництві карбамідних олігомерів

ЛК24мп.17.КП.00.004ЕЗ.1



						ЛК24мп.17.КП.00.004ЕЗ.1			
						Схема атоматизації	Лист	Маса	Масштаб
Зм.	Арк.	Недокум.	Підпис	Дата					
Розробив	Аршаний А.І.								
Перевірила									
Т. контр							Аркуш	Аркушів 1	
Н. контр						НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського", ІХФ гр ЛК-42мп			
Затверд.									

Додаток Б. Код програмної реалізації повільної моделі

```
clc; clear; close all;

% Номінальні параметри
K0 = 1;
T0 = 50;

% Змінені параметри ("повільна" динаміка)
K = 0.8 * K0;      % коефіцієнт підсилення зменшено на 20%
T = 1.2 * T0;      % стала часу збільшена на 20%

% Модель об'єкта з уповільненою динамікою
A = -1 / T;
B = K / T;
C = 1;
D = 0;

plant_slow = ss(A, B, C, D);

% Параметри регуляторів (незмінні)
K_opt = 0.1;
F = 0.8;

Kp_pid = 0.9;
Ki_pid = 0.05;

% Замкнені системи регулювання (для нового об'єкта)
A_opt = A - B * K_opt;
sys_opt = ss(A_opt, B, C, D);

A_rob = A - B * F;
sys_rob = ss(A_rob, B, C, D);

pid_tf = tf([Kp_pid Ki_pid], [1 0]);
```

```

sys_pid = feedback(pid_tf * plant_slow, 1);

% Імітація перехідного процесу (стрибок завдання 0 → 0.5)

t = 0:0.1:300;

r = ones(size(t)) * 0.5;

Pref_opt = 1 / dcgain(sys_opt);
Pref_rob = 1 / dcgain(sys_rob);

y_opt = lsim(sys_opt, Pref_opt * r, t);
y_rob = lsim(sys_rob, Pref_rob * r, t);
y_pid = lsim(sys_pid, r, t);

% Графік перехідної характеристики

figure;

plot(t, y_pid, 'g', 'LineWidth', 2); hold on;
plot(t, y_opt, 'b', 'LineWidth', 2);
plot(t, y_rob, 'r', 'LineWidth', 2);

grid on;

title('Сценарій 3: "Повільна" модель (K = 0.8, T = 60)');
xlabel('t, c');
ylabel('y(t)');

legend('PID-регулятор', 'LQR-регулятор', 'Робастний регулятор',
      'Location', 'Best');

```

Додаток В. Код програмної реалізації моделювання зовнішнього збурення на систему

```
clc; clear; close all;

%%Номінальні параметри об'єкта

K0 = 1;
T0 = 50;

A = -1 / T0;
B = K0 / T0;
C = 1;
D = 0;

%%Параметри регуляторів

K_opt = 0.1; % LQR-регулятор
F = 0.8; % Робастний регулятор
Kp_pid = 0.9; % PID (PI)
Ki_pid = 0.05;

%%Час моделювання

dt = 0.1;
t_end = 1000;
t = 0:dt:t_end;

%%Зовнішнє збурення d(t)

d = zeros(size(t));

for k = 1:length(t)
    tk = t(k);

    if tk >= 50 && tk < 100
        % лінійне наростання збурення: від 0 до 0.2 (50-100 с)
        d(k) = 0.2 * (tk - 50) / 50;

    elseif tk >= 100 && tk < 200
        % утримання максимуму 0.2 (100-200 с)
        d(k) = 0.2;

    elseif tk >= 200 && tk < 250
        % спад з 0.2 назад до 0 (200-250 с)
        d(k) = 0.2 * (1 - (tk - 200) / 50);
    end
end
```

```

%%Початкові стани
x_opt = 0;      % LQR
x_rob = 0;      % Робастний
x_pid = 0;      % PID
int_err = 0;    % інтегратор PID

y_opt = zeros(size(t));
y_rob = zeros(size(t));
y_pid = zeros(size(t));

%%Моделювання
for k = 2:length(t)

    %%керуючі дії
    u_opt = -K_opt * x_opt;      % LQR

    u_rob = -F * x_rob;          % Робастний

    e = 0 - x_pid;               % похибка PID (задане = 0)

    int_err = int_err + e * dt;  % інтегрування

    u_pid = Kp_pid * e + Ki_pid * int_err;

    %%модель об'єкта:  $\dot{x} = A x + B u + d(t)$ 
    x_dot_opt = A * x_opt + B * u_opt + d(k);
    x_dot_rob = A * x_rob + B * u_rob + d(k);
    x_dot_pid = A * x_pid + B * u_pid + d(k);

    %%метод Ейлера
    x_opt = x_opt + x_dot_opt * dt;
    x_rob = x_rob + x_dot_rob * dt;
    x_pid = x_pid + x_dot_pid * dt;

    %%вихід (y = x)
    y_opt(k) = x_opt;
    y_rob(k) = x_rob;
    y_pid(k) = x_pid;
end

%%Графік на всьому інтервалі

figure;

plot(t, y_pid, 'g', 'LineWidth', 2); hold on;
plot(t, y_opt, 'b', 'LineWidth', 2);
plot(t, y_rob, 'r', 'LineWidth', 2);

grid on;

```

```

title('Сценарій 4: Зовнішнє збурення на систему');
xlabel('t, c');
ylabel('y(t)');

legend('PID-регулятор', 'LQR-регулятор', 'Робастний регулятор',
       'Location', 'Best');

%%(за бажанням) окремий зум 0-200 c:

figure;

idx = t <= 450;

plot(t(idx), y_pid(idx), 'g', 'LineWidth', 2); hold on;
plot(t(idx), y_opt(idx), 'b', 'LineWidth', 2);
plot(t(idx), y_rob(idx), 'r', 'LineWidth', 2);

grid on;

title('Сценарій 4: Зовнішнє збурення на систему (0-200 c)');
xlabel('t, c');
ylabel('y(t)');

legend('PID-регулятор', 'LQR-регулятор', 'Робастний регулятор',
       'Location', 'Best');

```

Додаток Г. Код програмної реалізації ступінчастої зміни завдання

```
clc; clear; close all;

% Номінальна модель об'єкта

K0 = 1;
T0 = 50;

A = -1 / T0;
B = K0 / T0;
C = 1;
D = 0;

plant_nom = ss(A, B, C, D);

% Параметри регуляторів (номінальні)

K_opt = 0.1;
F = 0.8;

Kp_pid = 0.9;
Ki_pid = 0.05;

% Замкнені системи керування (номінальний об'єкт)

A_opt = A - B * K_opt;
sys_opt = ss(A_opt, B, C, D);

A_rob = A - B * F;
sys_rob = ss(A_rob, B, C, D);

pid_tf = tf([Kp_pid Ki_pid], [1 0]);
sys_pid = feedback(pid_tf * plant_nom, 1);

% Формуємо змінне завдання r(t):
% r = 0 (0 ≤ t < 100 c), потім r = 0.5 (t ≥ 100 c)

t = 0:0.1:300;
```

```

r = zeros(size(t));
r(t >= 100) = 0.5; % стрибок завдання на 0.5 в момент t = 100 с

% Імітація перехідного процесу при зміні завдання

Pref_opt = 1 / dcgain(sys_opt);
Pref_rob = 1 / dcgain(sys_rob);

y_opt = lsim(sys_opt, Pref_opt * r, t);
y_rob = lsim(sys_rob, Pref_rob * r, t);
y_pid = lsim(sys_pid, r, t);

% Графік перехідної характеристики при зміні завдання

figure;

plot(t, y_pid, 'g', 'LineWidth', 2); hold on;
plot(t, y_opt, 'b', 'LineWidth', 2);
plot(t, y_rob, 'r', 'LineWidth', 2);

grid on;

title('Сценарій 5: Ступінчаста зміна завдання pH');
xlabel('t, c');
ylabel('y(t)');

legend('PID-регулятор', 'LQR-регулятор', 'Робастний регулятор',
       'Location', 'Best');

```