

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Факультет інформаційних технологій та електроніки
Кафедра комп'ютерно-інтегрованих систем управління

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до магістерської науково-дослідної роботи

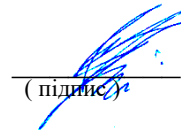
освітній ступінь: магістр

спеціальність: 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка

(шифр і назва спеціальності)

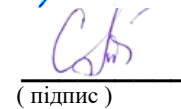
**на тему «Розробка комп'ютерно-інтегрованої системи контролю та
керування скруберам високого тиску Е-203 у виробництві карбаміду з
математичним моделюванням одноконтурної САР тиску»**

Виконав: студент групи АТП-24дм


(підпис)

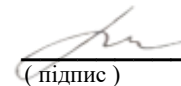
А. О. Гуленко

Керівник


(підпис)

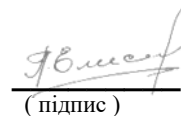
Т.Г. Сотнікова

Завідувачка кафедри


(підпис)

М.Г. Лорія

Рецензент


(підпис)

П.Й. Єлісєєв

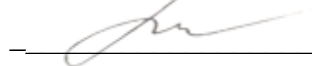
Київ 2025

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Факультет: Інформаційних технологій та електроніки
Кафедра: Комп'ютерно-інтегрованих систем управління
Освітньо-кваліфікаційний рівень: Магістр
Напрямок підготовки: 174 – Автоматизація комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувачка каф. КІСУ

 М.Г. Лорія

« 09 » грудня 2025 року

З А В Д А Н Н Я НА МАГІСТЕРСЬКУ НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Гуленко Анастасії Олександрівні

1. Тема магістерської НДР: «Розробка комп'ютерно-інтегрованої системи контролю та керування скруберам високого тиску Е-203 у виробництві карбаміду з математичним моделюванням одноконтурної САР тиску»

2. Керівник роботи: доц. Сотнікова Т.Г.

Затверджені наказом вищого навчального закладу №242/17.02 від 28.11.2025 р.

3. Термін подання студентом роботи 14 грудня 2025 р.

4. Вихідні дані до роботи:

4.1. Технологічний регламент та технічна документація процесу очищення газів у виробництві карбаміду із застосуванням скрубера високого тиску Е-203.

4.2. Інструкція оператора з експлуатації автоматизованої системи контролю та керування скруберам високого тиску Е-203.

4.3. Нормативно-технічні матеріали та рекомендації щодо проєктування систем автоматизованого керування апаратами високого тиску.

4.4. Публікації з питань автоматизованого контролю та керування процесами очищення газів у хімічній промисловості.

4.5. Публікації з математичного моделювання та синтезу одноконтурних систем автоматичного регулювання тиску технологічних об'єктів.

5. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

5.1. Вступ.

5.2. Сучасні підходи до автоматизації технологічних систем хімічних виробництв.

5.3. Оцінка технологічного процесу абсорбції в скрубери високого тиску е-203 під час виробництва карбаміду.

5.4. Створення та дослідження математичних моделей скрубера високого тиску Е-203 для оптимізації процесу синтезу карбаміду.

5.5. Створення математичної моделі високотискового скрубера Е-203 для процесу виробництва карбаміду.

5.6. Оцінка результатів теоретичного дослідження математичної моделі високотискового скрубера Е-203.

5.7. Обґрунтування ключових параметрів стабілізації і розробка схеми функціональної та структурної організації автоматизованого управління.

5.8. Аналіз впливу реологічних змінних на передавальну функцію системи.

5.9. Висновки.

6. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6.1. Структурні та функціональні схеми комп'ютерно-інтегрованої системи контролю та керування скрубера Е-203.

6.1.1. Структурна схема одноконтурної системи автоматичного регулювання тиску скрубера Е-203.

6.1.2. Архітектура комп'ютерно-інтегрованої системи керування скрубера високого тиску.

6.1.3. Алгоритмічна схема роботи САР тиску скрубера.

6.2. Мнемосхема комп'ютерно-інтегрованої системи контролю та керування скрубера.

6.3. Математична модель скрубера високого тиску як об'єкта регулювання.

6.4. Статичні та динамічні характеристики одноконтурної САР тиску скрубера.

6.5. Результати моделювання та показники якості регулювання тиску в скрубери Е-203.

7. **Дата видачі завдання:** 25 жовтня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Сучасні підходи до автоматизації технологічних систем хімічних виробництв.	1.11.2025	
2.	Оцінка технологічного процесу абсорбції в скрубери високого тиску е-203 під час виробництва карбаміду.	1.11.2025	
3.	Створення та дослідження математичних моделей скрубера високого тиску Е-203 для оптимізації процесу синтезу карбаміду.	5.11.2025	
4.	Створення математичної моделі високотискового скрубера Е-203 для процесу виробництва карбаміду.	8.11.2025	
5.	Оцінка результатів теоретичного дослідження математичної моделі високотискового скрубера Е-203.	15.11.2025	
6.	Обґрунтування ключових параметрів стабілізації і розробка схеми функціональної та структурної організації автоматизованого управління.	25.11.2025	
7.	Аналіз впливу реологічних змінних на передавальну функцію системи.	1.12.2025	
9.	Оформлення пояснювальної записки магістерської роботи та підготовка презентаційних матеріалів.	14.12.2025	

Здобувач вищої освіти _____ А. О. Гуленко

Керівник магістерської НДР _____ Т.Г. Сотнікова

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка 61 ст., 19 рисунків, 11 джерел.

Ключові слова: автоматизація, карбамід, технологічний аналіз, структурно-логічна схема, математичне моделювання, матеріальний баланс, незворотні реологічні перетворення, динаміка перехідних процесів, функціональна схема, АСР, комп'ютерно-інтегрована система контролю і керування.

Об'єктом дослідження є скрубєр високого тиску Е-203, що функціонує у складі технологічної лінії виробництва карбаміду.

Метою магістерської роботи є створення комп'ютерно-інтегрованої системи контролю та регулювання роботи скрубєра Е-203, а також побудова та дослідження математичних моделей цього апарата і одноконтурної системи автоматичного регулювання тиску.

Методологія дослідження ґрунтується на теоретичних підходах із використанням засобів електронно-обчислювальної техніки.

У ході роботи проаналізовано технологічний процес як об'єкт автоматизації, побудовано математичні моделі за різними теоретичними підходами, виконано їх дослідження та зіставлення. Також проведено аналіз динамічних характеристик скрубєра та одноконтурної системи автоматичного регулювання тиску.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ ХІМІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ.....	9
РОЗДІЛ 2. ОЦІНКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ АБСОРБЦІЇ В СКРУБЕРІ ВИСОКОГО ТИСКУ Е-203 ПІД ЧАС ВИРОБНИЦТВА КАРБАМІДУ	12
РОЗДІЛ 3. СТВОРЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ СКРУБЕРА ВИСОКОГО ТИСКУ Е-203 ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ СИНТЕЗУ КАРБАМІДУ	20
3.1. Створення математичної моделі високотискового скрубера Е-203 для процесу виробництва карбаміду.....	22
3.2. Оцінка результатів теоретичного дослідження математичної моделі високотискового скрубера Е-203.....	33
3.3. Обґрунтування ключових параметрів стабілізації і розробка схеми функціональної та структурної організації автоматизованого управління	36
3.4. Аналіз впливу реологічних змінних на передавальну функцію системи.....	39
ВИСНОВОК.....	41
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	42
Додатки.....	43

ВСТУП

Недоліками виробництва є економічне становище нашої держави, досить дорогий природний газ, застаріле обладнання та методи автоматизації, які використовуються на підприємствах. Це все заважає конкурувати на міжнародному ринку з більш сучасними підприємствами та тими підприємствами, де сировина дешевша.

Сучасний стан хімічної промисловості визначається низкою факторів, що ускладнюють ефективну роботу підприємств. До них належать нестабільна економічна ситуація, висока вартість природного газу, а також використання застарілого технологічного обладнання та неефективних систем автоматизації. У сукупності ці чинники знижують конкурентоспроможність виробництва на світовому ринку, особливо порівняно з підприємствами, які мають доступ до дешевшої сировини та впроваджують сучасні технологічні рішення.

У зв'язку з цим актуальною є задача створення математичних моделей технологічних апаратів за допомогою сучасних методів, зокрема методу незворотних реологічних перетворень. Такий підхід дає змогу глибше описати реальні фізико-хімічні процеси, що відбуваються в апараті, оцінити поведінку системи за відхилення від нормальних умов та підвищити точність прогнозування режимів роботи. У результаті це сприяє оптимізації виробництва, підвищенню його безпеки та зниженню собівартості продукції.

У межах роботи запропоновано поєднання класичних методів математичного моделювання та сучасного підходу, що враховує взаємодію хімічних реакцій з процесами перенесення теплоти, маси та енергії. Це дозволяє комплексно оцінювати перебіг технологічного процесу та своєчасно виявляти потенційно аварійні ситуації.

Предметом дослідження є електронно-обчислювальна система, яка виконує розрахунок регламентних показників виробництва карбаміду на основі встановлених алгоритмів.

Методи дослідження охоплюють теоретичний аналіз із застосуванням ЕОМ, включаючи побудову математичної моделі скрубера високого тиску Е-203, моделювання на основі теорії реологічних перетворень та методу нульового градієнта, а також розробку математичної моделі одноконтурної системи автоматичного регулювання тиску. Отримані результати використано для аналізу динаміки технологічного процесу та оцінки роботи САР.

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ ХІМІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ

Сучасний етап розвитку хімічної промисловості позначається інтенсивною інтеграцією високотехнологічних рішень, спрямованих на створення ефективних, стійких і ресурсозберігаючих виробничих систем. На тлі глобальної конкуренції, зростання вимог до стабільності якості продукції та необхідності відповідності міжнародним нормам безпеки, підприємства вимушені впроваджувати нові методи організації технологічних процесів і модернізувати системи керування. Поступове ускладнення технологічних схем, поява нових типів апаратів та високопродуктивних процесів призводять до того, що роль автоматизації зростає не як допоміжного елементу, а як фундаментальної складової сучасного виробництва.

Хімічні технологічні системи характеризуються багаторівневими, взаємопов'язаними механізмами, у яких одночасно відбуваються процеси теплопередачі, масообміну, фазових переходів, хімічних реакцій та внутрішніх реологічних перетворень. Така багатофакторність зумовлює значну нелінійність та інерційність процесів, що ускладнює їхнє ручне керування і робить необхідним використання спеціалізованих автоматизованих засобів. Багато параметрів — такі як температура, тиск, концентрація та витрата реагентів — чутливі до найменших змін у складі сировини або зовнішніх умов, тому потребують постійного моніторингу та швидкого коригування. У таких умовах здійснення керування без комп'ютеризованих систем стає практично неможливим, адже оператор не здатен оперативно оцінювати великі обсяги даних, аналізувати тенденції та передбачати поведінку об'єкта.

Значне місце в автоматизації займає забезпечення точності вимірювальної інформації. Датчики, вимірювачі та первинні перетворювачі формують інформаційну базу, на основі якої система приймає рішення. Будь-

яке спотворення даних призводить до того, що регулятор формує неправильний вплив на об'єкт, що може спричинити погіршення технологічного режиму, зниження виходу продукції або, в гіршому випадку, створення аварійної ситуації. Саме тому сучасна автоматизація включає застосування інтелектуальних сенсорних модулів, які не лише вимірюють параметри, а й здійснюють самодіагностику, виявлення дрейфу, автоматичну корекцію похибки та фільтрацію шумів.

Автоматизовані системи керування технологічними процесами (АСКТП) формуються як багатофункціональні комплекси, що поєднують моніторинг, регулювання, діагностику, оптимізацію та захист. У їхньому складі можуть працювати локальні регулятори, контролери ПЛК, централізовані SCADA-системи, програмні модулі оптимізації, алгоритми прогнозування та системи підтримки прийняття рішень. Усе це утворює цілісну середу, в якій кожен елемент виконує свою роль: одні підсистеми забезпечують збір і передачу інформації, інші здійснюють обробку даних в реальному часі, а треті забезпечують стабілізацію процесу відповідно до заданих параметрів. Особливо важливою є можливість швидкої адаптації до змін режимів, що досягається завдяки використанню математичних моделей процесів у структурі регуляторів.

Математичне моделювання у поєднанні з методами теорії керування стає центральним механізмом удосконалення автоматизованих систем. Моделі дають змогу описувати процеси на якісно новому рівні, враховуючи як локальні, так і глобальні закономірності. У хімічних апаратах — реакторах, колонах, скруберах — одночасно протікають процеси різної фізичної природи, тому моделювання має спиратися на комплексний підхід, який враховує теплові ефекти, внутрішню структуру потоків, кінетику реакцій, швидкість перемішування, фазові переходи та інші аспекти. Сучасні алгоритми дозволяють виконувати розрахунки в реальному часі, що робить моделі не лише аналітичним інструментом, а й невід'ємною частиною системи управління.

Комп'ютерно-інтегровані системи керування, які стрімко поширилися останніми роками, поєднують функції кількох рівнів автоматизації: від апаратного збору даних до високорівневої аналітики. Вони дозволяють проводити аналіз тенденцій, прогнозувати можливі відхилення, виконувати автоматичну оптимізацію і швидко реагувати на зміни технологічних умов. Такі системи особливо ефективні у процесах із великою інерційністю, де швидкість зміни параметрів незначна, але відхилення можуть мати накопичувальний характер, що притаманно багатьом хімічним процесам під високим тиском.

Автоматизація також відіграє ключову роль у забезпеченні промислової безпеки. Хімічне виробництво часто пов'язано з використанням токсичних, агресивних або вибухонебезпечних речовин, а також з роботою обладнання під підвищеним тиском та температурою. Системи автоматичного захисту дозволяють виявляти небезпечні ситуації ще на ранніх етапах, активувати аварійні алгоритми та запобігати розвитку критичних станів. Це значно знижує ризик аварій, збільшує ресурс обладнання та сприяє відповідності нормативним вимогам.

Загалом автоматизація виробничих процесів у хімічній промисловості забезпечує підвищення точності керування, мінімізацію впливу людського фактору, покращення стабільності якості продукції, раціональне використання енергоресурсів та зменшення технологічних втрат. Вона створює основу для переходу підприємств до більш високих стандартів технологічної культури, дозволяючи вигідно конкурувати на ринку та ефективно функціонувати навіть за умов високої ресурсної залежності та технічної зношеності обладнання.

РОЗДІЛ 2. ОЦІНКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ АБСОРБЦІЇ В СКРУБЕРІ ВИСОКОГО ТИСКУ Е-203 ПІД ЧАС ВИРОБНИЦТВА КАРБАМІДУ

Виробництво гранульованого карбаміду є одним із ключових напрямків сучасної хімічної промисловості, оскільки карбамід широко використовується не лише як ефективне азотне добриво, а й як сировина для виробництва різних промислових продуктів. Технологія виробництва базується на хімічній взаємодії аміаку та діоксиду вуглецю, яка реалізується за стріпінг-процесом у потоці CO_2 . Основна хімічна реакція проводиться у рідкій фазі при високому тиску 13,3–14,2 МПа і температурі 160–185 °С. Під час оптимального ведення процесу конверсія CO_2 у карбамід досягає не менше 54 %, що є важливим показником ефективності та рентабельності виробництва.

Технологічний процес включає п'ять основних стадій, кожна з яких виконує свою функцію і критично важлива для досягнення високого виходу продукту та стабільності роботи підприємства:

1. Стадія стискання аміаку (NH_3) призначена для підвищення тиску газоподібного аміаку до значень, необхідних для проведення реакцій синтезу карбаміду. Стискання здійснюється у багатоступеневих компресорних агрегатах із міжступневим охолодженням, що дозволяє зменшити енергетичні витрати та запобігти перегріву газу. Стабільність параметрів аміаку на виході з компресорів має вирішальне значення для забезпечення заданого співвідношення реагентів у реакційній зоні.

2. Стадія стискання діоксиду вуглецю (CO_2) забезпечує подачу CO_2 під високим тиском у синтез-контур. Аналогічно до стискання аміаку, процес відбувається у компресорах із системами охолодження та очищення газу. Особливістю цієї стадії є необхідність контролю вологості та чистоти CO_2 , оскільки домішки можуть негативно впливати на перебіг реакцій та

спричиняти корозію обладнання. Параметри тиску і витрати CO_2 безпосередньо впливають на ефективність утворення карбамату амонію.

3. Стискання повітря для систем КВПіА є допоміжною, але критично важливою стадією, що забезпечує функціонування пневматичних виконавчих механізмів, регуляторів і контрольно-вимірювальних приладів. Стиснене повітря повинно відповідати встановленим вимогам щодо тиску, чистоти та вологості, оскільки відхилення цих параметрів можуть призвести до некоректної роботи систем автоматичного керування. Надійність цієї стадії визначає стабільність роботи всієї автоматизованої системи управління.

4. Система маслопостачання і циркуляції теплоносія виконує функцію забезпечення безперебійної роботи компресорного та реакторного обладнання. Масло використовується для змащування, охолодження та ущільнення рухомих елементів машин, тоді як теплоносій забезпечує підтримання необхідних температурних режимів у технологічних апаратах. Порушення режимів маслопостачання або циркуляції теплоносія може призвести до зниження ресурсу обладнання або аварійних ситуацій, що обумовлює необхідність постійного контролю відповідних параметрів.

5. Стадія реакційного синтезу карбаміду є центральною у технологічному процесі та реалізується у реакторах високого тиску. На цій стадії відбувається взаємодія аміаку з діоксидом вуглецю з утворенням карбамату амонію та його подальша дегідратація до карбаміду. Процес проходить за підвищених температур і тисків, а його ефективність значною мірою залежить від точності підтримання технологічних параметрів. Саме на цій стадії зосереджені основні завдання автоматизованого керування, пов'язані з регулюванням температури, тиску та співвідношення реагентів.

Виробничий цикл синтезу карбаміду ґрунтується на використанні двох основних реагентів — аміаку, що подається у рідкому стані, та діоксиду вуглецю у газовій фазі. Діоксид вуглецю формується як побічний продукт у процесах аміачного виробництва та проходить багатоступеневе очищення від домішок у системах абсорбції із застосуванням розчинів карсолу або

моноетаноламіну. На стадії регенерації абсорбенту досягається високий ступінь очищення газу, внаслідок чого концентрація CO_2 становить близько 99 %, що є необхідною умовою для стабільного перебігу подальших хімічних перетворень.

Хімічний процес утворення карбаміду реалізується у рідинному середовищі за підвищених температур і тисків та має поетапний характер. Перетворення вихідних компонентів відбувається послідовно через проміжні сполуки, що зумовлює необхідність точного контролю термодинамічних і кінетичних параметрів процесу. Така організація синтезу забезпечує можливість оптимізації режимів роботи установки, підвищення ступеня перетворення реагентів та стабільності якісних характеристик кінцевого продукту.

Формування карбаміду відбувається у рідинному середовищі та включає дві послідовні стадії хімічних перетворень. На першому етапі в умовах підвищеного тиску та температури відбувається взаємодія аміаку з діоксидом вуглецю з утворенням карбамату амонію, який є проміжною сполукою процесу. Дана реакція характеризується високою швидкістю перебігу та екзотермічним ефектом, що зумовлює необхідність ефективного тепловідведення і стабілізації режимних параметрів.

Другий етап процесу полягає у перетворенні карбамату амонію шляхом дегідратації з утворенням карбаміду та води. На відміну від першої стадії, ця реакція має більш повільну кінетику та є ендотермічною, що вимагає підтримання відповідного температурного режиму. Сумарна ефективність синтезу визначається узгодженістю перебігу обох стадій, а також точністю регулювання температури, тиску та мольного співвідношення реагентів.

Інтенсивність перебігу реакцій у системі синтезу карбаміду визначається поєднанням тиску, температури та складу реакційної суміші. За тисків, що перевищують 10 МПа, і температурних значень понад 150 °C формування карбамату амонію відбувається з високою швидкістю, що свідчить про сприятливі умови для реалізації першої стадії процесу. Водночас наступне

перетворення карбамату шляхом відщеплення молекули води характеризується значно меншою швидкістю і є визначальним фактором, який обмежує загальну інтенсивність утворення карбаміду. Підвищення температури сприяє прискоренню дегідратації, проте ефект має нелінійний характер і досягає граничного значення в обмеженому діапазоні. Для систем, що працюють при тиску близько 20 МПа, найбільш сприятливі умови відповідають температурі порядку 200–210 °С, за якої реалізується максимальний рівноважний вихід продукту.

Важливою термодинамічною характеристикою процесу є мольний склад реакційної суміші. Збільшення частки аміаку призводить до зміщення хімічної рівноваги в бік утворення карбаміду, що безпосередньо відображається на ступені перетворення діоксиду вуглецю. За умов стехіометричного співвідношення реагентів граничний рівень утворення карбаміду обмежується значеннями близько 50–53 %, тоді як при роботі з надлишком аміаку цей показник може зростати до 75–80 %. Визначення оптимального співвідношення реагентів є складною техніко-економічною задачею, оскільки надмірне збільшення кількості аміаку, незважаючи на позитивний вплив на вихід, ускладнює подальші процеси сепарації та рециркуляції. У промислових умовах найчастіше застосовуються режими, що відповідають надлишку аміаку на рівні 50–200 % відносно теоретично необхідної кількості.

Технологічний процес синтезу карбаміду відзначається значною інерційністю, що зумовлено великим об'ємом реакційної зони та повільною динамікою встановлення рівноваги. Час перебування реакційної маси в апаратах високого тиску, як правило, становить від 35 до 50 хвилин, що суттєво впливає на характер перехідних процесів і вимоги до систем автоматичного керування.

Подача реагентів у зону синтезу здійснюється після відповідної підготовки. Рідкий аміак зі складських ємностей транспортується під тиском 1,1–1,4 МПа, проходить стадії фільтрації та теплової підготовки, після чого

за допомогою насосного обладнання високого тиску спрямовується до реакційного апарата. Діоксид вуглецю у газовій фазі попередньо очищується від сірковмісних домішок, накопичується в буферних ємностях і подається на компримування до робочого тиску 19–22 МПа, що визначається прийнятою схемою виробництва. Залежно від конструктивних особливостей установки, реагенти можуть вводитися безпосередньо в реактор або попередньо змішуватися для забезпечення більш однорідного складу потоку перед надходженням у зону реакції.

У промислових установках синтезу карбаміду найбільшого поширення набули технологічні схеми з повним рідинним рециклом непрореагованих реагентів, а також продуктів розкладання карбамату, що перебувають у вигляді аміаку та вуглеамонійних солей (ВАС). Застосування таких схем забезпечує мінімізацію втрат сировини та підвищення ефективності функціонування замкненого синтез-контур.

Аміак, який відганяється на першій стадії дистиляції, подається до промивної колони, де очищується від домішок, після чого конденсується та повертається у систему синтезу. Розчин вуглеамонійних солей (ВАС), що утворюється в промивній колоні, спрямовується до змішувача колони синтезу, забезпечуючи безперервну циркуляцію реагентів.

Пари аміаку, що відводяться з другої стадії дистиляції, направляються на конденсацію водяної пари. У результаті цього процесу за наявності аміаку та діоксиду вуглецю утворюється розчин вуглеамонійних солей (ВАС), частина якого використовується для зрошення промивної колони, а надлишок накопичується у збірнику ВАС. Після другої стадії дистиляції водний розчин карбаміду з масовою часткою близько 70 % надходить до вакуум-випарної установки, де здійснюється видалення частини води разом із розчиненими аміаком та діоксидом вуглецю.

Після вакуумного випарювання розчин карбаміду спрямовується на наступні етапи очищення та переробки з метою отримання кінцевого продукту у вигляді кристалів або гранул. Водночас пари та інші відгонні

компоненти конденсуються і надходять у загальний збірник розчину вуглеамонійних солей (ВАС). Газова суміш, яка не піддалася повній конденсації у конденсаторі другої стадії дистиляції, подається до абсорбційної колони, де аміак і діоксид вуглецю поглинаються слабким розчином ВАС, що циркулює через холодильний апарат. Інертні гази після очищення відводяться із системи у безпечне середовище.

Ослаблений розчин ВАС зі збірника подається у десорбер, де практично повністю виділяються аміак і діоксид вуглецю. Після десорбції газова суміш повертається до конденсатора другої стадії дистиляції для повторного використання у технологічному циклі, тоді як конденсована вода виводиться з процесу через технологічний канал, забезпечуючи ефективну циркуляцію реагентів та підтримання сталого режиму виробництва.

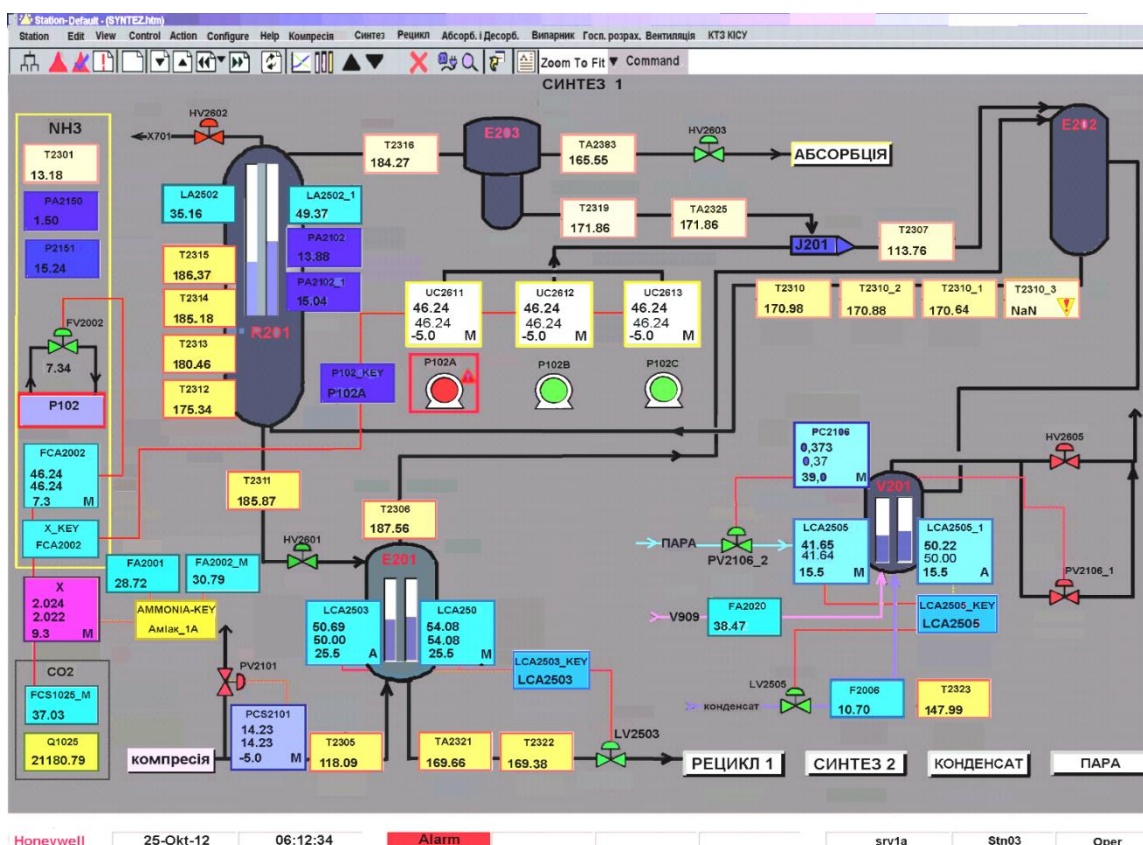


Рис. 1.2. Блок-схема KISKU технологічного процесу карбаміду

У промисловому синтезі карбаміду контроль над параметрами реакційної колони R201 є критично важливим для забезпечення стабільного протікання процесу та високої ефективності перетворення реагентів. Зокрема,

підвищення тиску у верхній частині колони до 17 МПа автоматично фіксується системою KISCU на відеотерміналі робочої станції оператора, що дозволяє в режимі реального часу відстежувати стан технологічної стадії синтезу карбаміду. При таких умовах ступінь конверсії діоксиду вуглецю у карбамід не менше 54 %, що відповідає нормативним показникам продуктивності і стабільності реакційного середовища.

Для підтримки оптимальних умов хімічної взаємодії та запобігання небажаних коливань у гідродинамічному режимі, рівень рідкої фазової суміші у колоні контролюється буйковим рівнеміром. Ця система забезпечує безперервне відстеження висоти шару реакційної суміші, що містить 31–34 % масової частки карбаміду, а також проміжні компоненти – амонійний карбамат, аміак, діоксид вуглецю та воду.

Через переливну воронку верхньої частини колони реакційна суміш направляється у стрипер E201, де відбувається розділення фаз: рідка фаза продовжує технологічний цикл, а парогазова фаза, що містить інертні гази та непрореаговані NH_3 і CO_2 , відводиться у скруббер E203. У скруббері здійснюється контакт газової фази з розчином вуглеамонійних солей (ВАС), що забезпечує часткову конденсацію парів, поглинання непрореагованих компонентів та рекуперацію теплової енергії. Такий підхід дозволяє значно знизити втрати реагентів і підвищити економічну ефективність процесу.

Тепло, що виділяється при конденсації, відводиться охолоджуючим конденсатом, який циркулює в міжтрубному просторі апарату. Для нормальної роботи скруббера подача конденсату повинна становити 160–200 м³/год при температурі не нижче 100 °С, а перепад температури між входом і виходом не повинен бути менше 8 °С. Це забезпечує ефективне поглинання газів, підтримку стабільної температури процесу та мінімізацію втрат теплової енергії.

Парогазова фаза після сепарації відводиться через запірний клапан, а концентрований розчин ВАС з температурою не нижче 158 °С надходить у конденсатор E202 для додаткової конденсації та підготовки до повторного

введення у технологічний цикл. Контроль зниження температури нижче критичної межі здійснюється KICKY і відображається на відеотерміналі, що дозволяє оператору здійснювати своєчасну корекцію режиму.

Комп'ютеризована інформаційно-керуюча система «Exregion PKS» (Honeywell) інтегрує контроль ключових параметрів технологічного процесу: температури по висоті колони (TIR-3 – TIR-7), рівня рідини у верхній частині (LIRCASHL-2) та тиску в колоні (PIRCASHL-1). Додатково, у скрубєрі E203 контролюється температура парогазової фази та розчину ВАС на виході (TIRANL-9, TIRAL-10), температури охолоджуючого конденсату на вході та виході (TIRAL-11, TIRANL-13), різниця цих температур (TIRAL-12) та витрата конденсату (FIRCAL-14).

Завдяки багаторівневому контролю забезпечується стійкий технологічний режим, висока конверсія CO_2 у карбамід та раціональне використання енергії, що є критично важливим для промислового виробництва. Така система дозволяє підтримувати оптимальні умови синтезу, зменшувати ризики технологічних відхилень та забезпечувати високу якість кінцевого продукту.

РОЗДІЛ 3. СТВОРЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ СКРУБЕРА ВИСОКОГО ТИСКУ Е-203 ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ СИНТЕЗУ КАРБАМІДУ

Математичне моделювання скрубера за методом незворотних реологічних перетворень:

Диференціальний вираз, що описує перший реологічний перехід у скрубері, може бути представленим у вигляді рівняння:

$$\frac{\partial T_1(\xi, \theta)}{\partial \theta} + a_1 \frac{\partial^2 T_1(\xi, \theta)}{\partial \xi^2} + w_1 \frac{\partial T_1(\xi, \theta)_1}{\partial \xi} = \gamma_{1c}[y, t, \gamma_{2c}(x, t)] \quad (3.1)$$

де a_1 - коефіцієнт температуропровідності речовини джерела, що характеризує здатність матеріалу проводити тепло;

$w_1 = F_1 / S_1$ - лінійна швидкість руху потоку джерела, що визначає швидкість переміщення речовини у скрубері;

F_1 - об'ємна витрата потоку джерела, що показує кількість речовини, яка проходить через апарат за одиницю часу;

S_1 - площа теплообміну, через яку здійснюється передача теплової енергії;

$\gamma_1[y, t, \gamma_2(x, t)]$ - тепловий потік на першому реологічному переході товщиною у за час t ;

$\gamma_2(x, t)$ - тепловий потік другого реологічного переходу.

Дане рівняння дозволяє кількісно описати розподіл тепла у потоці речовини під час першого етапу реологічного перетворення, враховуючи як фізико-хімічні властивості матеріалу, так і гідродинамічні характеристики потоку.

Оскільки передача теплової енергії крізь стінку апарата відбувається за механізмом тепловіддачі, кількість теплоти Q_1 , що відводиться із зовнішньої поверхні стінки, може бути описана диференціальним співвідношенням:

$$dq_1(\xi, \theta) = \alpha_1 [T_1 - T_1(\xi, \theta)] d\theta = \alpha_1 \Delta T_{11}(\xi, \theta) d\theta, \quad (3.2)$$

У свою чергу, теплова енергія Q_2 , яка передається від внутрішньої поверхні стінки до рідинного середовища, визначається виразом:

$$dq_2(\xi, \theta) = \alpha_2 [T_2(\xi, \theta) - T_2] d\theta = \alpha_2 \Delta T_{22}(\xi, \theta) d\theta, \quad (3.3)$$

де α_1 - коефіцієнт тепловіддачі від джерела теплової енергії до зовнішньої поверхні стінки;

α_2 - коефіцієнт тепловіддачі від внутрішньої поверхні стінки до рідинного середовища.

У випадку, коли джерелом тепла виступає перегріта пара, кількість теплоти, що сприймається зовнішньою поверхнею стінки внаслідок фазового переходу, визначається співвідношенням:

$$dq_{\Pi} = r F_{\Pi} d\theta, \quad (3.4)$$

де r - теплота фазового переходу пари; F_{Π} - масова витрата пари.

$$dq_T = F_T c_T T_1 d\theta, \quad (3.5)$$

де F_T - масова витрата теплоносія;

c_T - питома теплоємність теплоносія;

T_1 - його температура.

Частина теплової енергії накопичується безпосередньо у матеріалі стінки апарата, що може бути визначено за формулою:

$$dq_m = m_c c_{pm} dT_1(\xi, \theta), \quad (3.6)$$

де m_c - маса стінки;

c_{pm} - питома теплоємність матеріалу стінки.

Аналогічно, кількість теплоти, яка акумулюється у рідинному середовищі, визначається залежністю:

$$dq_{pc} = m_{pc} c_{pc} dT_2(\xi, \theta), \quad (3.7)$$

де m_{pc} - маса рідинного середовища;

c_{pc} - питома теплоємність рідинного середовища.

У разі, коли рідинне середовище перебуває в русі, тепла енергія, що відводиться з системи разом із потоком цього середовища, визначається як кількість теплоти, яка переноситься рухомою рідиною:

$$dq_c = F_{pc} c_{pc} T_2(x, t) dt, \quad (3.8)$$

де q_c - кількість теплової енергії, що відводиться разом із потоком рідинного середовища;

F_{pc} - масова витрата рідинної фази, яка визначає інтенсивність винесення теплоти;

$T_2(x, t)$ - температура потоку на виході у напрямку x за проміжок часу t .

На основі наведених вище теоретичних положень і теплотехнічних залежностей можна сформулювати рівняння теплового балансу, що описує процес відведення теплової енергії:

- для реологічного переходу товщиною δ_1

$$dq_T = dq_m + dq_1(\xi, \theta) + dq_2(\xi, \theta), \quad (3.9)$$

- для реологічного переходу товщиною δ_2

$$dq_2(\xi, \theta) = dq_{pc} + dq_c. \quad (3.45)$$

Після відповідних перетворень рівняння (3.39) та (3.40) можуть бути подані у такому узагальненому вигляді:

$$\tau' \frac{dT_1(y,t)}{dt} + T_1(y,t) = k'_1 T_1 + k'_2 [T_2(y,t) - T_2], \quad (3.10)$$

де $\tau' = m_c c_{pc} / \alpha_1$ - стала часу першого реологічного переходу;

$k_1 = 1 - F_T c_{pm} / \alpha_1$, $k_2 = \alpha_2 / \alpha_1$ - коефіцієнти передачі, що

характеризують інтенсивність теплопереносу.

Аналогічно для другого реологічного переходу отримуємо співвідношення:

$$\tau'' \frac{dT_2(y,t)}{dt} + T_2(y,t) = T_2 + k_2'' T_2(x,t), \quad (3.11)$$

де $\tau'' = m_{pc} c_{pc} / \alpha_2$ - стала часу другого реологічного переходу;

$k_2'' = F_{pc} c_{pc} / \alpha_2$ - коефіцієнт передачі теплової енергії.

За умови, що зміна просторової координати x відбувається за аналогічним законом, що й зміна координати y , вихідне рівняння (3.41) може бути приведене до спрощеного диференціального вигляду:

$$\tau''' \frac{dT_2(y,t)}{dt} + T_2(y,t) = k''' T_2, \quad (3.12)$$

де $\tau''' = \tau'' / (1 - k_2'')$ - стала часу; $k''' = 1 / (1 - k_2'')$ - коефіцієнт передачі.

$$T_2(x,t) = \tau' \frac{dT_1(y,t)}{dt} + k''' T_1(y,t) - k_{12}' T_1 + T_2$$

та її похідну

$$\frac{dT_2(x,t)}{dt} = \tau' \frac{d^2 T_1(y,t)}{dt^2} + k''' \frac{dT_1(y,t)}{dt}$$

і підставимо в рівняння (3.12). Результатом чого є:

$$\tau_{12}^2 \frac{d^2 T_1(y, t)}{dt^2} + \tau_{11} \frac{dT_1(y, t)}{dt} + T_1(y, t) = k_1 T_1 + k_2 T_2, \quad (3.13)$$

де $\tau_{12}^2 = \tau' \tau''' / k'''$, $\tau_{11} = (k''' \tau''' + \tau') / k'''$ - сталі часу;

$k_1 = k'_{12} / k'''$, $k_2 = 1 - 1/k'''$ - коефіцієнти передачі.

Функція теплового стоку визначається шляхом диференціювання рівняння (3.14) за часом θ :

$$\gamma_{1C} [y, t, \gamma_{2C}(x, t)] = \tau_{12}^2 \frac{d^3 T_1(y, t)}{dt^3} + \tau_{11} \frac{d^2 T_1(y, t)}{dt^2} + \frac{dT_1(y, t)}{dt} \quad (3.15)$$

Підстановка (3.44) приводить до нелінійного диференціального рівняння:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_1(\xi, \theta)}{\partial \theta} + a_1 \frac{\partial^2 T_1(\xi, \theta)}{\partial \xi^2} + w_1 \frac{\partial T_1(\xi, \theta)_1}{\partial \xi} = \\ = -\tau_{12}^2 \frac{d^3 T_1(y, t)}{dt^3} - \tau_{11} \frac{d^2 T_1(y, t)}{dt^2} - \frac{dT_1(y, t)}{dt} \end{aligned} \quad (3.16)$$

З метою подальшого аналізу рівняння (3.16) розділяється на систему рівнянь:

$$\frac{\partial T_1(\xi, \theta)}{\partial \theta} = a_1 \frac{\partial^2 T_1(\xi, \theta)}{\partial \xi^2} + w_1 \frac{\partial T_1(\xi, \theta)}{\partial \xi}; \quad (3.17)$$

$$\tau_{12}^2 \frac{d^2 T_1(y, t)}{dt^2} + \tau_{11} \frac{dT_1(y, t)}{dt} + T_1(y, t) = 0 \quad (3.18)$$

$$a_1 \frac{\partial^2 T_1(\xi, \theta)}{\partial \xi^2} + w_1 \frac{\partial T_1(\xi, \theta)_1}{\partial \xi} = -\tau_{12}^2 \frac{d^3 T_1(y, t)}{dt^3} - \tau_{11} \frac{d^2 T_1(y, t)}{dt^2} - 2 \frac{dT_1(y, t)}{dt}$$

,

яка після відповідних математичних перетворень приводиться до системи лінійних диференціальних рівнянь:

$$\left(\frac{a_1}{w_1}\right) \frac{\partial T_1(\xi, t)}{\partial \xi} + T_1(\xi, t) = 0 \quad ; \quad (3.19)$$

$$\tau_{12} \frac{d^2 T_1(y, t)}{dt^2} + \tau_{11} \frac{dT_1(y, t)}{dt} + T_1(y, t) = 0 \quad . \quad (3.20)$$

Такий підхід значно спрощує подальше отримання аналітичних розв'язків і дозволяє окремо розглядати часові та просторові складові процесу теплопереносу.

За аналогією з поняттям сталої часу, відношення (a_1 / w_1) назовемо сталою відстані перенесення тепла і позначимо її χ . Фізично дана величина відповідає ширині зони реологічного переходу δ_1 , у межах якої відбувається основна зміна температурного поля, що узгоджується з представленою на рис. 3.1 схемою. З урахуванням цього рівняння (3.48) може бути записане у вигляді:

$$\delta_1 \frac{\partial T_1(\xi, t)}{\partial \xi} + T_1(\xi, t) = 0 \quad . \quad (3.21)$$

Граничними умовами для рівняння (3.50) будуть: при $\xi = 0$ $T_1(0, t) = T_1$; при $y = \delta_1$ приймемо, що $T_1(\delta_1, t) = T_2(\xi, t)$; при $t = 0$ $\frac{dT_1(\xi, 0)}{d\xi} = 0$. Тоді рішенням рівняння (3.50) приймає вигляд

$$T_1(\delta_1, t) = [T_1(y, t) - T_2(\xi, t)] \exp(-y / \delta_1) \quad . \quad (3.22)$$

Граничними умовами для рівняння (3.49) будуть: при $t = 0$

$T_1(y, 0) = T_1$; при $t = \infty$ $\frac{dT_1(y, \infty)}{dt} = 0$. Тоді рішенням цього рівняння при $\tau_{11} / \tau_{12} > 2$ буде

$$T_1(y, t) = T_1 \left[\frac{p_{12}}{\Delta p_1} \exp\left(-\frac{t}{p_{11}}\right) - \frac{p_{11}}{\Delta p_1} \exp\left(-\frac{t}{p_{12}}\right) \right]_1, \quad (3.23)$$

$$\text{де } p_{11,22} = -\frac{\tau_{11}}{2\tau_{12}^2} \pm \sqrt{\left(\frac{\tau_{11}}{2\tau_{12}^2}\right)^2 - \frac{1}{\tau_{12}^2}}; \Delta p_1 = p_{12} - p_{11}.$$

Рівняння (3.27) буде подано в такій формі:

$$T_1(\delta_1, t) = \left\{ T_1 \left[\frac{p_{12}}{\Delta p_1} \exp\left(-\frac{t}{p_{11}}\right) - \frac{p_{11}}{\Delta p_1} \exp\left(-\frac{t}{p_{12}}\right) \right] - T_2(\delta_2, t) \right\} \exp(-y / \delta_1) \quad (3.24)$$

Як видно з рис. 3.1, у межах другого реологічного переходу теплота від стінки з температурою $T_2(0, t)$ унаслідок процесу тепловіддачі надходить у зону реологічного перетворення товщиною δ_2 , після чого передається рідинному середовищу за рахунок спільної дії конвективного та молекулярного механізмів теплопереносу. Даний процес описується диференціальним рівнянням:

$$\frac{\partial T_2(\xi, \theta)}{\partial \theta} + a_2 \frac{\partial^2 T_2(\xi, \theta)}{\partial \xi^2} + w_2 \frac{\partial T_2(\xi, \theta)_1}{\partial \xi} = \gamma_{2c} [x, t, \gamma_{1c}(y, t)] \quad (3.25)$$

де a_2 - температуропровідність нагріваючої речовини;

$w_2 = F_2 / S_2$ - лінійна швидкість руху потоку джерела;

F_2 - об'ємна витрата потоку джерела;

$S_2 = S_1$ - поверхня теплообміну;

$\gamma_2[x, t, \gamma_1(y, t)]$ - стік тепла на другому реологічному переході товщиною x за час t ;

$\gamma_1(y, t)$ - стік першого реологічного переходу.

Рівняння теплового балансу для другого реологічного переходу має вигляд

$$q_2(0, \theta) = q_2(\xi, \theta) + q_c(x, t), \quad (3.26)$$

де $q_2(0, \theta)$ - кількість теплоти, яка передається від стінки до рідинного середовища;

$q_2(\xi, \theta)$ - кількість теплоти, накопичену в пограничному шарі товщиною ξ за час перенесення тепла θ ;

$q_c(x, t)$ - кількість тепла, яка виноситься потоком у результаті конвективного та молекулярного перенесення.

виноситься потоком у результаті конвективного та молекулярного перенесення h , а втрата теплової енергії q_{cm} , то кількість тепла

$$q_2(0, \theta) = q_1(\delta_1, \theta) - q_{cm}. \quad (3.27)$$

Оскільки передача теплової енергії через стінку відбувається шляхом тепловіддачі $q_1(\delta_1, \theta)$, яка віддається зовнішній стороні стінки,

$$dq_1(\delta_1, \theta) = \alpha_1 [T_1 - T_1(\delta_1, \theta)] d\theta, \quad (3.28)$$

Кількість теплоти, яка накопичується в стінці

$$dq_{cm} = m_{cm} c_{pm} dT_1(\delta_1, \theta), \quad (3.29)$$

де m_{cm} - маса стінки;

c_{pm} - питома теплоємність матеріалу стінки.

Виходить, кількість тепла, яка відводиться від внутрішньої сторони перегородки, буде рівна:

$$dq_1(\delta_1, \theta) - dq_{cm} = q_2(\xi, \theta) + q_c(x, t). \quad (3.30)$$

Так як перенесення тепла через стінку здійснюється тепловіддачею, то кількість теплової енергії q_2 , яка віддається від стінки до рідинного середовища,

$$dq_2(\xi, \theta) = \alpha_2 [T_2(0, \theta) - T_2(\xi, \theta)] d\theta, \quad (3.31)$$

Припустимо, що теплопередача через стінку здійснюється за рахунок лінійного закону, то $T_2(0, \theta) = k_c T_1(\delta_1, \theta)$, де k_c - коефіцієнт втрати тепла стінкою. В такому випадку трівняння (3.57) буде виглядати таким чином:

$$dq_2(\xi, \theta) = \alpha_2 [k_c T_1(\delta_1, \theta) - T_2(\xi, \theta)] d\theta. \quad (3.32)$$

У разі рухомого рідинного середовища теплота, яка виноситься потоком, визначається співвідношенням:

$$dq_c = F_{pc} c_{pc} T_2(x, t) dt, \quad (3.33)$$

$T_2(x, t)$ - температура стоку в напрямку x за час стоку t .

$$\bar{\tau} \frac{dT_2(0, \theta)}{d\theta} + T_2(0, \theta) = k' T_1 - k'' T_2 + k'' [T_2(x, t)] \quad (3.34)$$

де $\bar{\tau} = m_{cm} c_{pm} / \alpha_1 k_c$ стала часу другого реологічного перетворення;

$k' = 1/k_c$; $k'' = F_{pc} c_{pc} / \alpha_1 k_c$ - коефіцієнти перетворення.

Процес теплового стоку рідинним середовищем описується диференціальним рівнянням:

$$\tau'' \frac{dT_2(x, t)}{dt} + T_2(x, t) = T_2(0, \theta), \quad (3.35)$$

де $\tau'' = m_c / F_{pc}$ - стала часу стоку.

Похідна якого наведена:

$$\frac{dT_2(0, \theta)}{d\theta} = \tau'' \frac{d^2 T_2(x, t)}{dt^2} + \frac{dT_2(x, t)}{dt}. \quad (3.36)$$

Підставимо рівняння (3.63) і (3.65) у (3.62). Отримаємо результат:

$$\tau_{22}^2 \frac{d^2 T_2(x, t)}{dt^2} + \tau_{21} \frac{dT_2(x, t)}{dt} + T_2(x, t) = k_{21} T_1 - k_{22} T_2, \quad (3.37)$$

де $\tau_{22}^2 = \tau'' \bar{\tau} / (1 - k_c)$; $\tau_{21} = (\tau'' + \bar{\tau}) / (1 - k_c)$ - сталі часу;

$k_{21} = k' / (1 - k_c)$; $k_{22} = k'' / (1 - k_c)$ - коефіцієнти перетворення.

Так як $k' = 1/k_C$, а $k'' = F_{pc} c_{pc} / \alpha_1 k_C$, то при $F_{pc} c_{pc} = \alpha_1$ $k_{21} = k_{22} = k_{20}$.

В такому випадку рівняння (3.65) подається в новій формі:

$$\tau_{22}^2 \frac{d^2 T_2(x, t)}{dt^2} + \tau_{21} \frac{dT_2(x, t)}{dt} + T_2(x, t) = k_{20} (T_1 - T_2) = k_{20} \Delta T_{12} \quad (3.38)$$

Подальше диференціювання (3.66) за часом t , дозволяє отримати вираз:

$$\gamma_{2C} [x, t, \gamma_{1C}(y, t)] = \tau_{22}^2 \frac{d^3 T_2(x, t)}{dt^3} + \tau_{21} \frac{dT_2^2(x, t)}{dt^2} + \frac{dT_2(x, t)}{dt} \quad (3.39)$$

Підставлення (3.27) у (3.23) приводить до нелінійного диференціального рівняння другого реологічного переходу:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_2(\xi, \theta)}{\partial \theta} + a_2 \frac{\partial^2 T_2(\xi, \theta)}{\partial \xi^2} + w_2 \frac{\partial T_2(\xi, \theta)_1}{\partial \xi} = \\ = -\tau_{22}^2 \frac{d^3 T_2(x, t)}{dt^3} - \tau_{21} \frac{dT_2^2(x, t)}{dt^2} - \frac{dT_2(x, t)}{dt} \end{aligned} \quad (3.40)$$

Приймаючи, що $\partial \xi = dx$, а $\partial \theta = dt$, з (3.68) маємо

$$\begin{aligned} a_2 \frac{\partial^2 T_2(\xi, \theta)}{\partial \xi^2} + w_2 \frac{\partial T_2(\xi, \theta)_1}{\partial \xi} = \\ = -\tau_{22}^2 \frac{d^3 T_2(x, t)}{dt^3} - \tau_{21} \frac{dT_2^2(x, t)}{dt^2} - 2 \frac{dT_2(x, t)}{dt} \end{aligned} \quad (3.41)$$

Застосування методу нульового градієнта (3.69) дозволяє розділити на наступну систему рівнянь:

$$\frac{a_2}{w_2} \frac{\partial T_2(\xi, \theta)}{\partial \xi} + T_2(\xi, \theta) = 0 \quad ; \quad (3.42)$$

$$\tau_{22}'^2 \frac{d^2 T_2(x, t)}{dt^2} - \tau_{21}' \frac{dT_2(x, t)}{dt} - T_2(x, t) = 0 \quad , \quad (3.43)$$

де $\delta_2 = a_2 / w_2$; $\tau_{22}'^2 = 0,5 \tau_{22}^2$; $\tau_{21}' = 0,5 \tau_{21}$;

$$\delta_1 \frac{\partial T_1(\xi, t)}{\partial \xi} + T_1(\xi, t) = 0 \quad . \quad (3.44)$$

За відповідних граничних умов рівняння (3.70) будуть: при $\xi = 0$
 $T_2(0, t) = T_2$; при $x = \delta_2$ прийнемо, що $T_2(\delta_2, t) = T_1(\delta_1, t)$; при $t = 0$
 $\frac{dT_2(\xi, \infty)}{d\xi} = 0$.

В результаті рішення рівняння (3.50) буде

$$T_2(\delta_2, t) = [T_1(\delta_1, t) - T_2] \exp(-\xi / \delta_2). \quad (3.45)$$

Граничними умовами будуть: при $t = 0$ $T_2(x, 0) = T_2$; при $t = \infty$
 $\frac{dT_2(x, \infty)}{dt} = 0$. Тоді рішенням цього рівняння при $\tau_{21} / \tau_{22} > 2$ буде

$$T_2(x, t) = T_2(\delta_2, t) \left[\frac{p_{22}}{\Delta p_2} \exp\left(-\frac{t}{p_{21}}\right) - \frac{p_{21}}{\Delta p_2} \exp\left(-\frac{t}{p_{22}}\right) \right]_1, \quad (3.46)$$

$$\text{де } p_{21,22} = -\frac{\tau_{21}}{2\tau_{22}^2} \pm \sqrt{\left(\frac{\tau_{21}}{2\tau_{22}^2}\right)^2 - \frac{1}{\tau_{22}^2}}; \Delta p_2 = p_{22} - p_{21}.$$

Підставивши, отримуємо

$$T_2(x, t) = [T_1(\delta_1, t) - T_2] \left[\frac{p_{22}}{\Delta p_2} \exp\left(-\frac{t}{p_{21}}\right) - \frac{p_{21}}{\Delta p_2} \exp\left(-\frac{t}{p_{22}}\right) \right] \exp(-x / \delta_2)_1. \quad (3.47)$$

$$\text{Позначимо } B_1 = \frac{p_{12}}{\Delta p_1} \left[\exp\left(-\frac{t}{p_{11}}\right) - \frac{p_{11}}{p_{12}} \exp\left(-\frac{t}{p_{12}}\right) \right],$$

$$B_2 = \frac{p_{22}}{\Delta p_2} \left[\exp\left(-\frac{t}{p_{21}}\right) - \frac{p_{21}}{p_{22}} \exp\left(-\frac{t}{p_{22}}\right) \right].$$

У результаті, підставивши (3.52) у (3.83), отримуємо:

$$T_1(y, t) = \{B_1 T_1 - T_2(x, t)\} \exp(-y / \delta_1); \quad (3.48)$$

$$T_2(x, t) = B_2 [T_1(y, t) - T_2] \exp(-x / \delta_2). \quad (3.49)$$

Розв'язанн системи рівнянь відносно $T_1(y, t)$ і $T_2(x, t)$, дає змогу отримати математичні моделі розподілу температури по обидва боки теплопередаючої стінки:

$$T_1(y, t) = B_1 T_1 \exp(-y / \delta_1) \frac{1 + (B_2 / B_1)(T_2 / T_1) \exp(-x / \delta_2)}{1 + B_2 \exp(-x / \delta_2 - y / \delta_1)} ; \quad (3.50)$$

$$T_2(x, t) = B_2 T_2 \exp(-x / \delta_2) \frac{1 + B_1 (T_1 / T_2) \exp(-y / \delta_1)}{1 + B_2 \exp(-y / \delta_1 - x / \delta_2)} . \quad (3.51)$$

З урахуванням, що $\delta_1 = a_1 / w_1$ і $\delta_2 = a_2 / w_2$, тоді матимемо:

$$T_1(y, t) = B_1 T_1 \exp\left(-y \frac{w_1}{a_1}\right) \frac{1 + (B_2 / B_1)(T_2 / T_1) \exp\left(-x \frac{w_2}{a_2}\right)}{1 + B_2 \exp\left(-x \frac{w_2}{a_2} \left(1 - \frac{y w_1 a_2}{x w_2 a_1}\right)\right)} ; \quad (3.52)$$

$$T_2(x, t) = B_2 T_2 \exp\left(-x \frac{w_2}{a_2}\right) \frac{1 + B_1 (T_1 / T_2) \exp\left(-y \frac{w_1}{a_1}\right)}{1 + B_2 \exp\left(-x \frac{w_2}{a_2} \left(1 - \frac{y w_1 a_2}{x w_2 a_1}\right)\right)} \quad (3.53)$$

Відповідно до теорії теплопровідності, відстань поширення тепла внаслідок тепловіддачі визначається як відношення коефіцієнта теплопровідності до коефіцієнта тепловіддачі, тобто $z = \lambda / \alpha$. В результаті, прийнявши $y = \lambda_1 / \alpha_1$ та $x = \lambda_2 / \alpha_2$, і враховуючи, що коефіцієнт теплопровідності $a = \lambda / c_p \rho$, матимемо:

$$T_1(t) = B_1 T_1 \exp\left(-w_1 \frac{c_{p1} \rho_1}{\alpha_1}\right) \frac{1 + \left(\frac{B_2 T_2}{B_1 T_1}\right) \exp\left(-w_2 \frac{c_{p2} \rho_2}{\alpha_2}\right)}{1 + B_2 \exp\left(-w_2 \frac{c_{p2} \rho_2}{\alpha_2} \left(1 - \frac{w_1 \alpha_2 c_{p1} \rho_1}{w_2 \alpha_1 c_{p2} \rho_2}\right)\right)} ; \quad (3.54)$$

$$T_2(t) = B_2 T_2 \exp\left(-w_2 \frac{c_{p2} \rho_2}{\alpha_2}\right) \frac{1 + B_1 \left(\frac{T_1}{T_2}\right) \exp\left(-w_1 \frac{c_{p1} \rho_1}{\alpha_1}\right)}{1 + B_2 \exp\left(-w_2 \frac{c_{p2} \rho_2}{\alpha_2} \left(1 - \frac{w_1}{w_2} \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \frac{c_{p1}}{c_{p2}} \frac{\rho_1}{\rho_2}\right)\right)} \quad (3.55)$$

Якщо взяти до уваги, що $w_1 S_1 = F_{o1}$, а $w_2 S_2 = F_{o2}$, де S_1, S_2 - перетини потоків джерела і рідинного середовища у поперечному напрямку; F_{o1}, F_{o2} - об'ємні витрати цих потоків, а також те, що масові витрати $F_{m1} = F_{o1} \rho_1$, $F_{m2} = F_{o2} \rho_2$, тоді:

$$T_1(t) = B_1 T_1 \exp(-\beta_1 F_{m1}) \frac{1 + (\kappa_T B_2 / B_1) \exp(-\beta_2 F_{m2})}{1 + B_2 \exp\left(-\beta_2 F_{m2} \left(1 - \beta_3 \frac{F_{m1}}{F_{m2}}\right)\right)}; \quad (3.56)$$

$$T_2(t) = B_2 T_2 \exp(-\beta_2 F_{m2}) \frac{1 + (B_1 / \kappa_T) \exp(-\beta_1 F_{m1})}{1 + B_2 \exp\left(-\beta_2 F_{m2} \left(1 - \beta_3 \frac{F_{m1}}{F_{m2}}\right)\right)}, \quad (3.57)$$

$$\text{де } \beta_1 = c_{p1} / \alpha_1 S_1, \beta_2 = c_{p2} / \alpha_2 S_2, \beta_3 = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \frac{c_{p1}}{c_{p2}} \frac{S_2}{S_1}, \kappa_T = T_2 / T_1 < 1.$$

Температурні коливання в зонах реологічних переходів суттєво залежать від масових витрат теплової енергії джерела F_{m1} та рідинного середовища F_{m2} . Далі розраховується співвідношення температур $T_2(t)/T_1(t)$. Визначивши, що $\Delta T(t) = T_1(t) - T_2(t)$, маємо

$$\Delta T(t) = T_1(t) \left\{ \frac{1 - \kappa_T \frac{B_2}{B_1} \exp\left[-\beta_2 F_{m2} \left(1 - \frac{\beta_1}{\beta_2} \left(\frac{F_{m1}}{F_{m2}}\right)\right)\right]}{1 + (\kappa_T B_2 / B_1) \exp(-\beta_2 F_{m2})} * \frac{1 + (B_1 / \kappa_T) \exp(-\beta_1 F_{m1})}{1 + (\kappa_T B_2 / B_1) \exp(-\beta_2 F_{m2})} \right\} \quad (3.58)$$

З рівняння виходить, що при $\beta_1 = \beta_2 = \beta_0$, $\beta_3 = 1$ і $F_{m1} = F_{m2} = F_{m0}$

маємо

$$\Delta T(t) = B_1 T_1 \exp(-\beta_0 F_{m0}) \left\{ 1 - \kappa_T \frac{B_2}{B_1} \frac{[1 + (B_1 / \kappa_T) \exp(-\beta_0 F_{m0})]}{[1 + (\kappa_T B_2 / B_1) \exp(-\beta_0 F_{m0})]} \right\} \quad (3.59)$$

3.2. Оцінка результатів теоретичного дослідження математичної моделі високотискового скрубера Е-203

Для дослідження динаміки тиску у скрубєрі Е-203 було здійснено розрахунки за рівнянням (3.60) із використанням програмного комплексу Maple. На основі отриманих числових даних проведено їхній детальний аналіз та побудовано відповідні графічні залежності, що дозволяють оцінити поведінку системи під різними умовами.

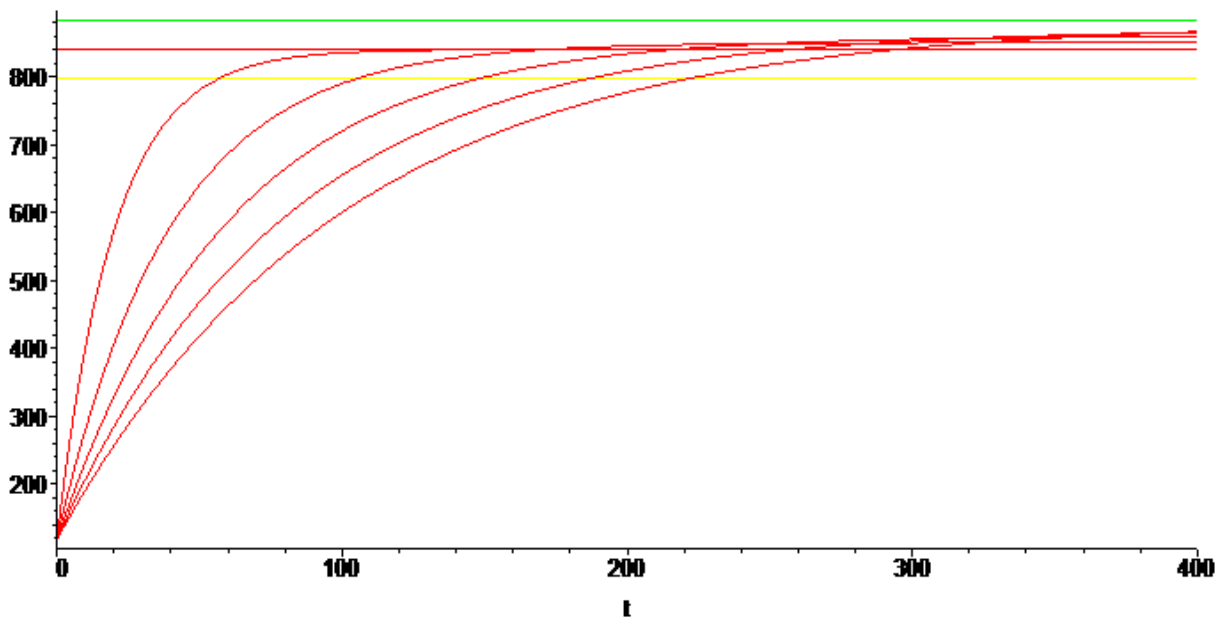


Рис.3.1. Взаємозв'язок від T_{10} та τ_ξ

На рис.3.1. ілюстровано одночасну дію двох факторів — температурних коливань у апараті та змін площі поверхні — на поведінку досліджуваного параметра, що дозволяє оцінити комплексний ефект цих змін.

На рис.3.2. можна спостерігати різницю у часі досягнення 5%-ної зони кривої порівняно з випадком, якби її поведінка була лінійною.

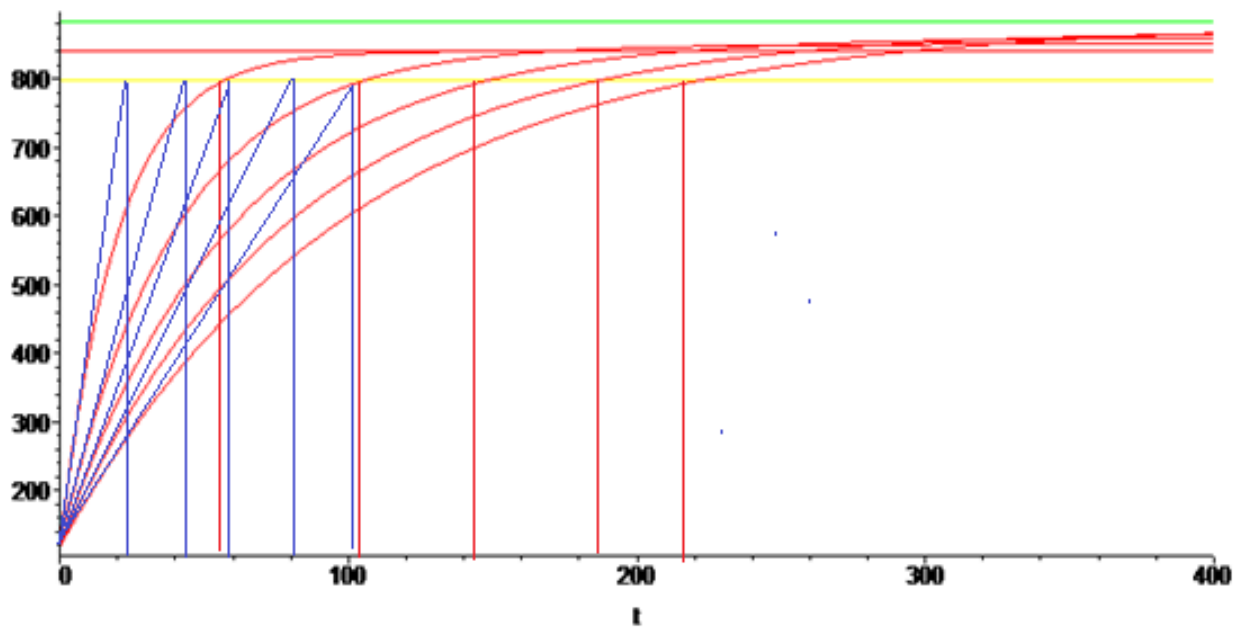


Рис.3.2. Взаємозв'язок між T_{10} та τ_{ξ} з урахуванням часу перебування реагенту в апараті

На рис.3.3. можна виділити процес, залежний виключно від τ_{ξ} , T_{10} - стала.

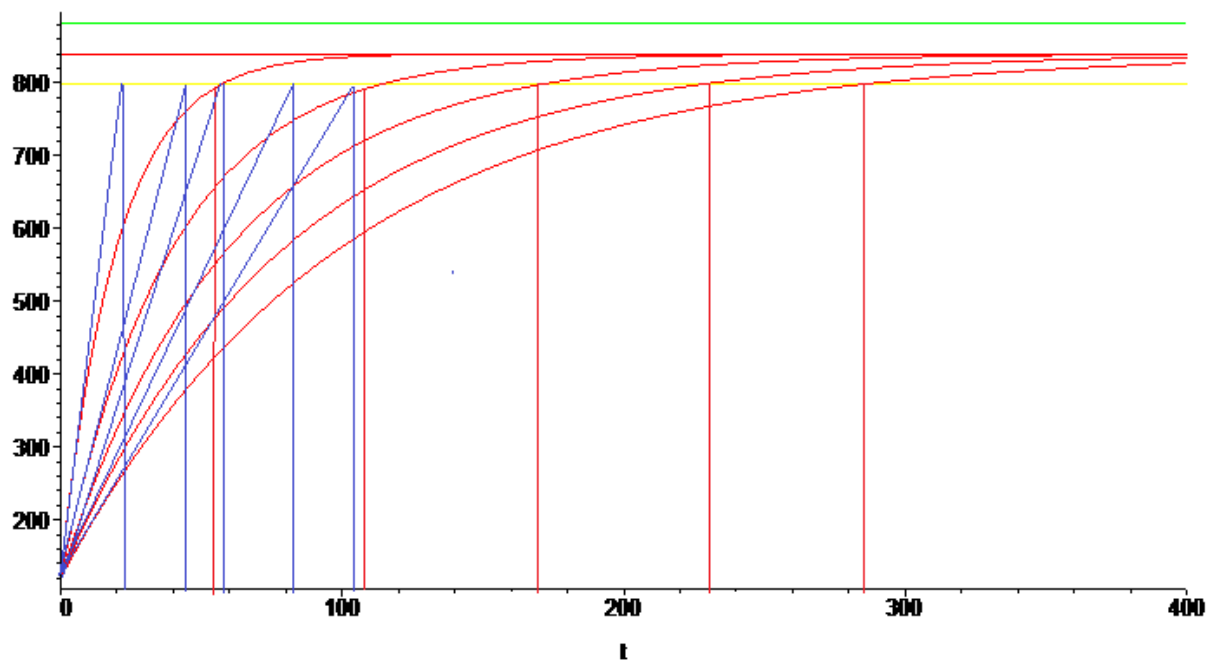


Рис.3.3. Залежність від τ_{ξ} , T_{10} - стала

На рис.3.4. можна виділити процес, залежний виключно від T_{10} , τ_{ξ} - стала.

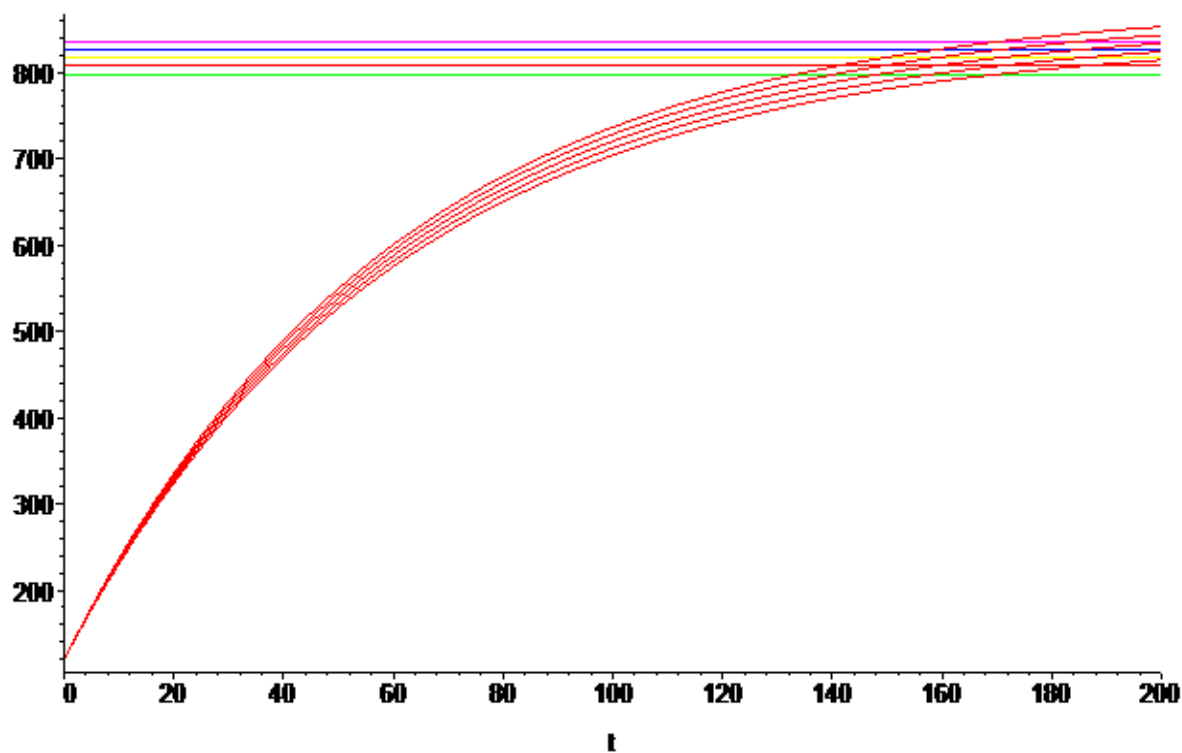


Рис.3.4. Залежність від T_{10} , τ_{ξ} - стала

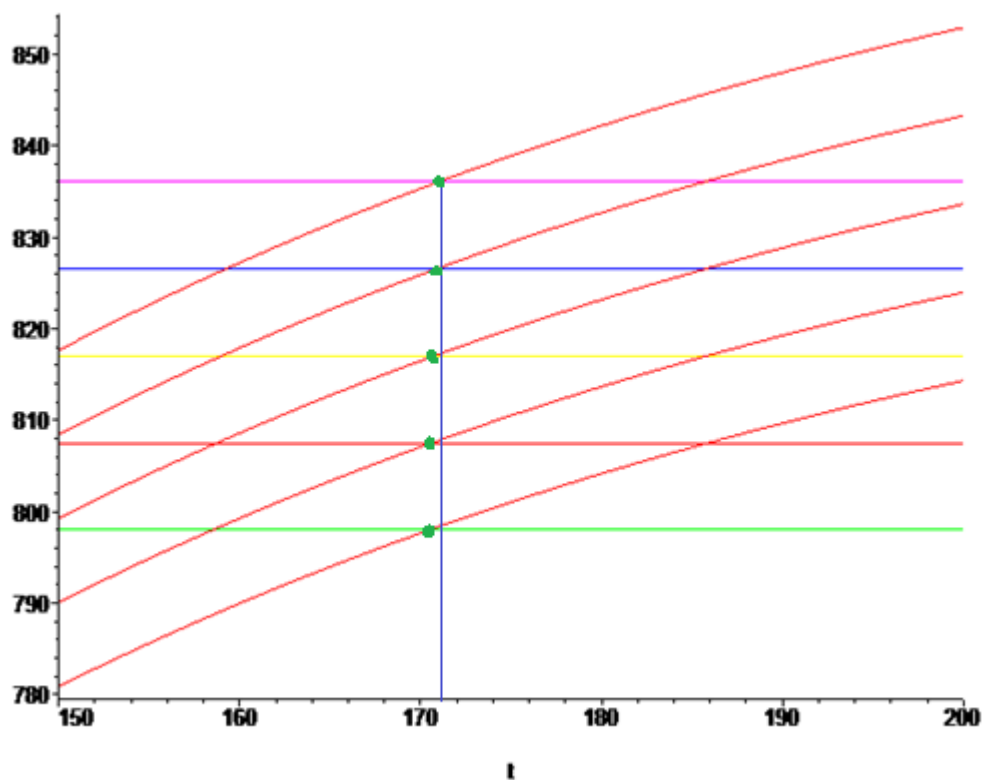


Рис.3.4.1. Залежність від T_{10} , τ_{ξ} - стала

Лінійний характер перехідних процесів можна наочно відстежити, побудувавши графік за дискретними точками (Рис. 3.4.1).

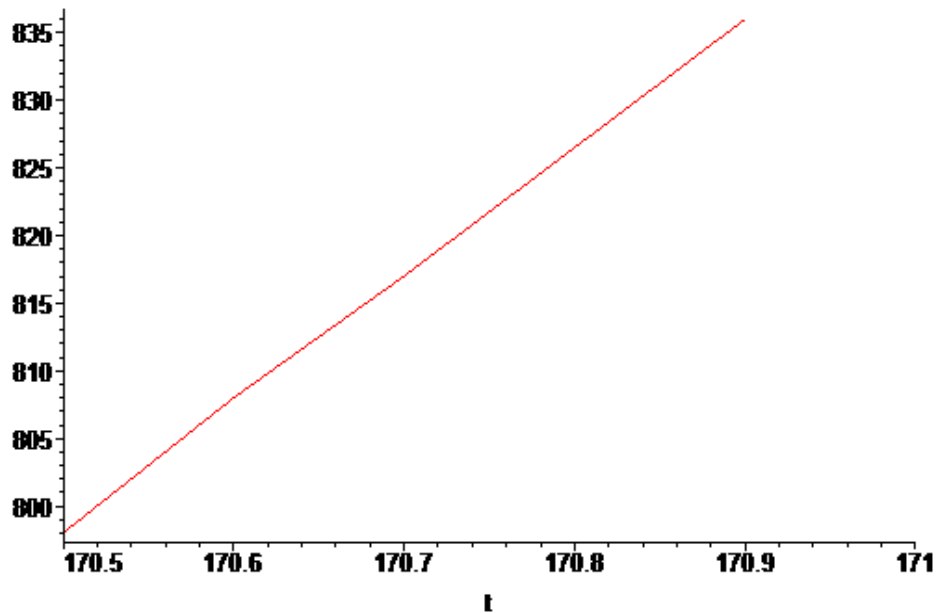


Рис.3.4.2. Перехідні процеси корелюють між собою лінійним чином

3.3 Обґрунтування ключових параметрів стабілізації і розробка схеми функціональної та структурної організації автоматизованого управління

Обчислення передавальної функції системи:

$$W(s) = \frac{W_p(s)W_2(s)W_3(s)W_4(s)}{1+W_p(s)W_2(s)W_3(s)W_4(s)W_5(s)W_6(s)} \quad y$$

На першому етапі здійснюється визначення еквівалентного об'єкта керування

$$W_0(s)=W_2(s)W_3(s)W_4(s)W_5(s)W_6(s)$$

Далі, підставивши передавальні функції всіх складових ланок системи, проводиться математичне формування еквівалентного об'єкта керування.

Результати розрахунків відображено у вигляді графічних залежностей:

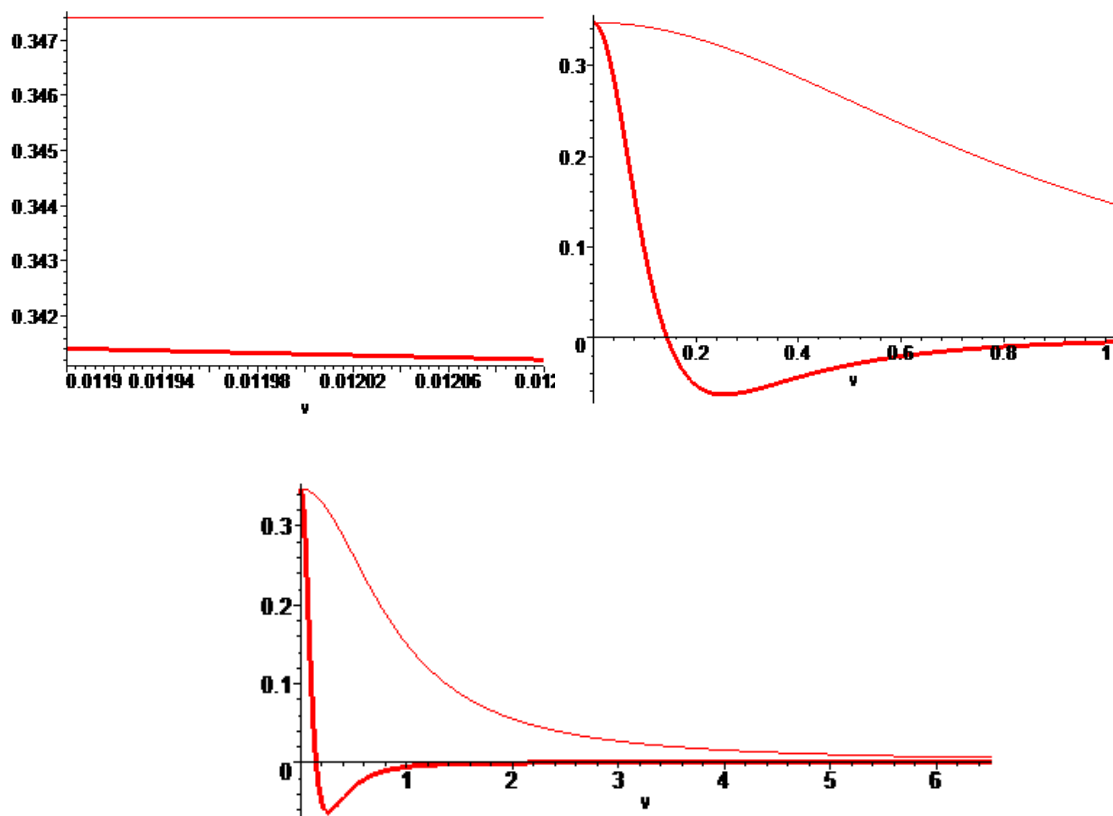
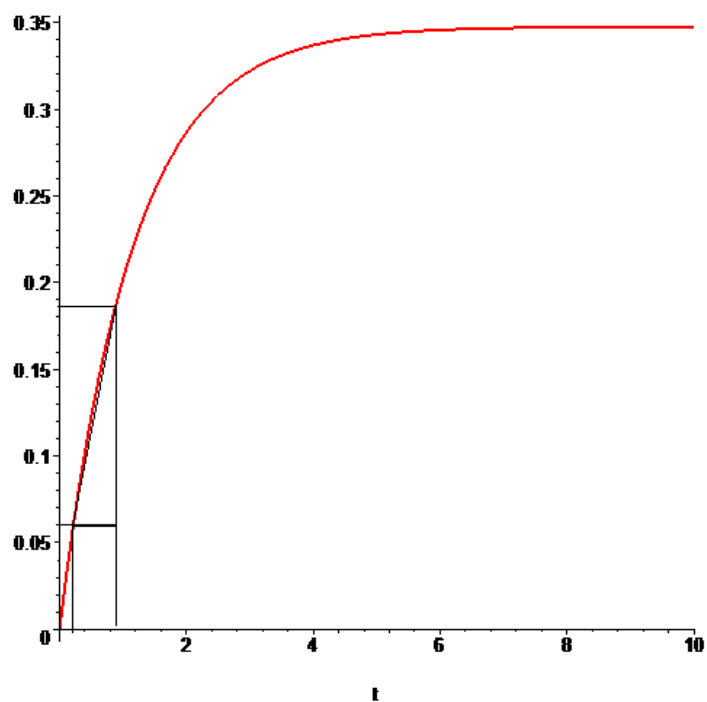


Рис. 3.6. Графік розгону еквівалентного об'єкта керування

Далі проводиться розрахунок оптимальних налаштувальних коефіцієнтів ПІ-регулятора на основі отриманої кривої розгону.



Далі проводиться розрахунок передавальної функції системи керування, а отримані графіки піддаються порівняльному аналізу з кривими ідентифікованого об'єкта керування для оцінки відповідності динамічних характеристик.

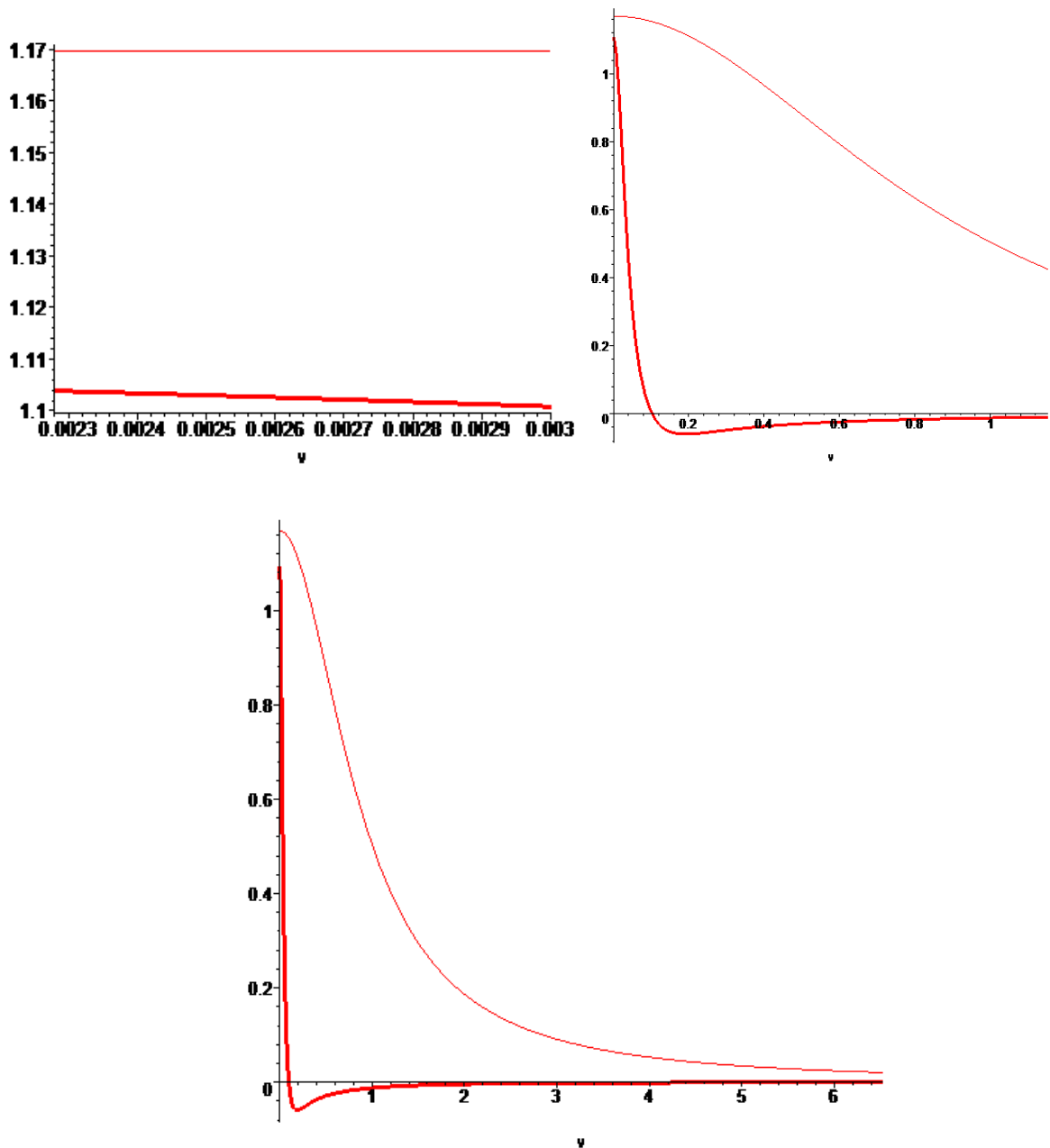


Рис. 3.8. Графічне представлення передавальних функцій системи керування та ідентифікованого об'єкта керування

На наступному кроці здійснюється обчислення передавальної функції одноконтурної системи керування по заданому регулюючому каналу.

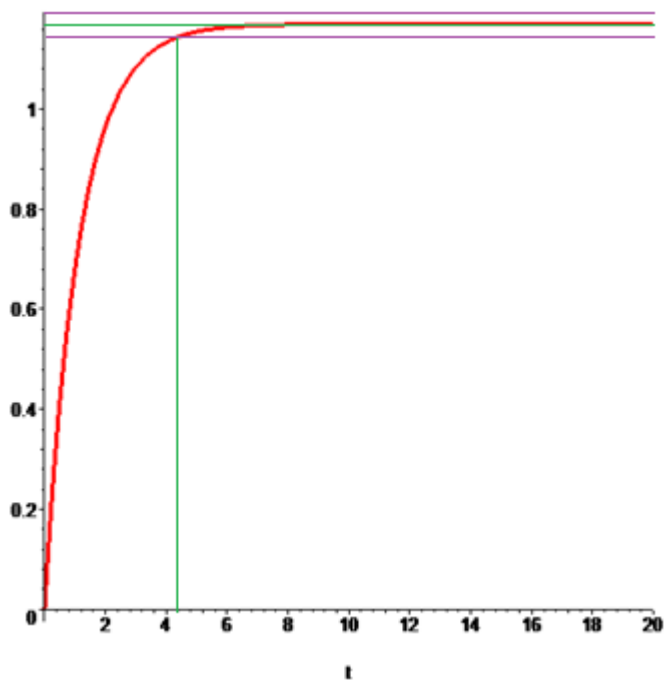


Рис. 3.9. Графік передавального процесу по регулюючому каналу

3.3. Аналіз впливу реологічних змінних на передавальну функцію системи

При використанні формули об'єднання двох математичних моделей (3.64) у передавальній функції отримані криві розгону набули такого вигляду:

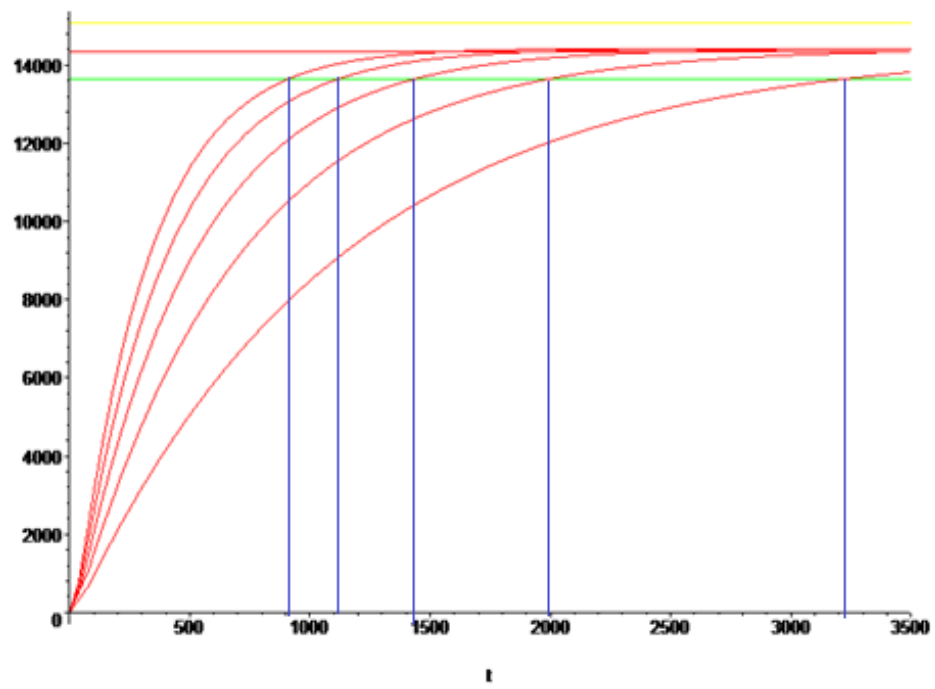


Рис. 3.12. Графік кривих розгону, де залежність від T_{10} , τ_{ξ} - стала (Додаток 3)

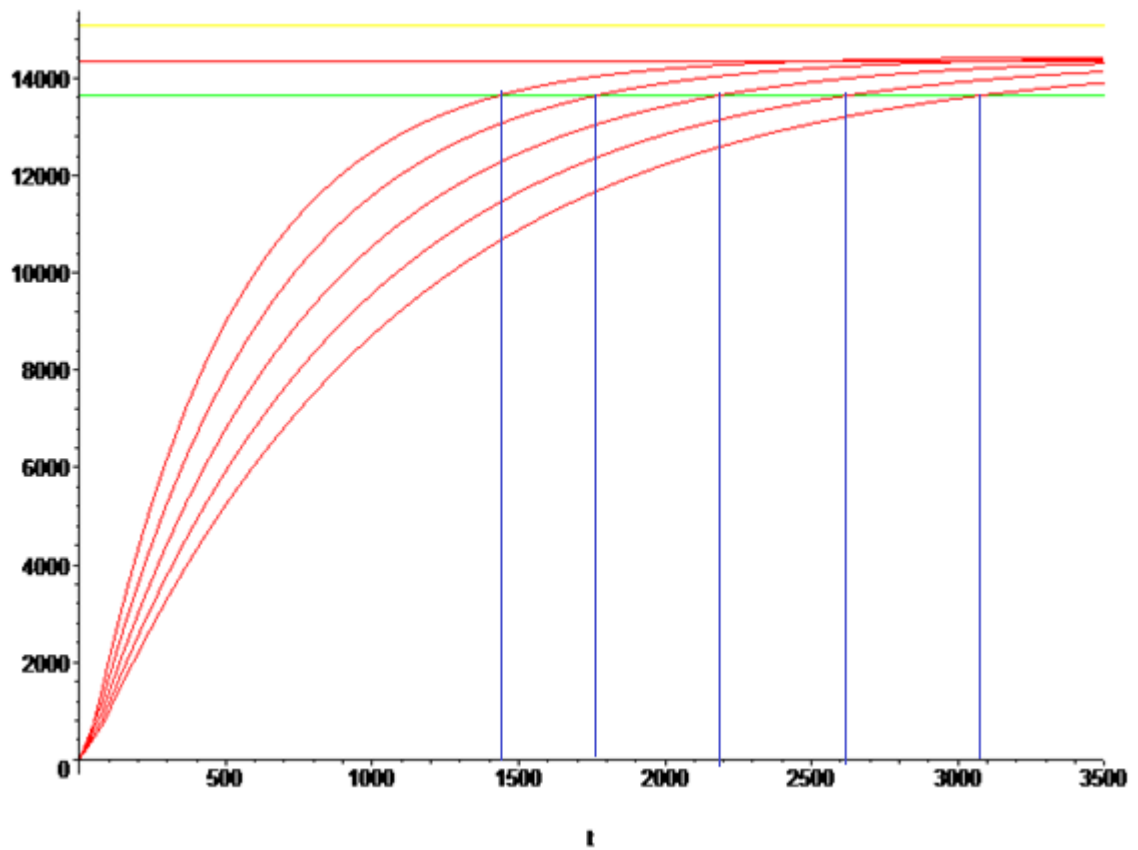


Рис. 3.13. Графік кривих розгону, де залежність від τ_{ξ} , T_{10} - стала (Додаток 3)

ВИСНОВОК

У межах даної магістерської науково-дослідної роботи виконано комплекс досліджень, спрямованих на розробку та аналіз комп'ютерно-інтегрованої системи контролю та управління технологічним процесом виробництва карбаміду. Робота охоплює як теоретичні, так і прикладні аспекти автоматизації хімічних технологічних систем.

У ході дослідження проведено детальний аналіз технологічного процесу виробництва карбаміду з урахуванням його фізико-хімічних та динамічних особливостей. На основі теорії реологічних перетворень із застосуванням методу нульового градієнта розроблено математичні моделі основних елементів технологічного об'єкта. Отримані результати теоретичних досліджень проаналізовано, що дало змогу оцінити адекватність моделей та їх відповідність реальним умовам функціонування процесу.

У роботі також здійснено опис комп'ютерно-інтегрованої системи контролю та управління, визначено її структурні та функціональні особливості. Для системи автоматичного регулювання розроблено математичні моделі одноконтурних САР та проведено їх теоретичне дослідження. На основі аналізу отриманих перехідних характеристик встановлено, що зміна температури в апараті за регламентних умов, за яких параметр не виходить за межі критичних значень, не чинить суттєвого впливу на характер перехідного процесу та швидкість входження системи у п'ятивідсоткову зону допустимих відхилень.

Отримані результати підтверджують ефективність запропонованих підходів до математичного моделювання та автоматизованого керування технологічним процесом виробництва карбаміду і можуть бути використані при проєктуванні та вдосконаленні систем автоматизації аналогічних хімічних виробництв.

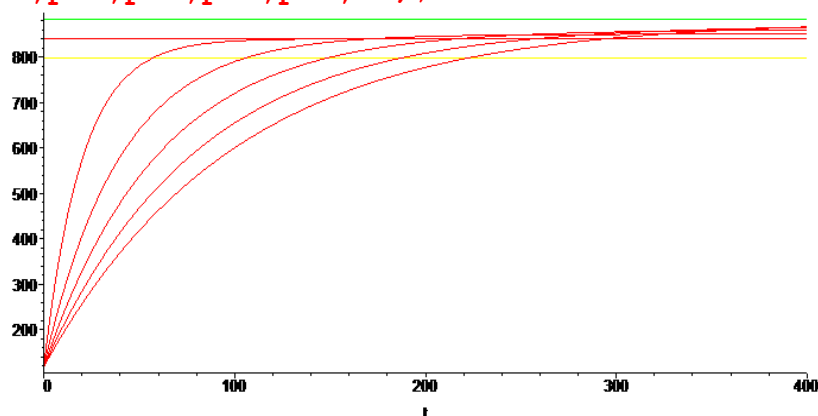
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Биков В. Ю. Комп'ютерно-інтегровані системи управління : монографія. Київ : ІТЗН НАПН України, 2018. 280 с.
2. Ладанюк А. П., Власенко Л. О., Луцька Н. М. Автоматизація технологічних процесів : навчальний посібник. Київ : НУХТ, 2019. 352 с.
3. Сотнікова Т. Г., Лорія М. Г. Комп'ютерно-інтегровані системи управління технологічними процесами : навчальний посібник. Сєверодонецьк : СНУ ім. В. Даля, 2017. 214 с.
4. Бойко О. В. Автоматизовані системи керування : підручник. Харків : ХНУРЕ, 2018. 420 с.
5. Кулик В. В., Плахотнік О. В. Інформаційні та керуючі системи в автоматизації : навчальний посібник. Львів : Львівська політехніка, 2020. 268 с.
6. Кучерук В. Ю. Моделювання та аналіз комп'ютерно-інтегрованих систем : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2019. 310 с.
7. Лисенко О. І., Шевченко А. П. Проектування автоматизованих систем управління : навчальний посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 295 с.
8. Палагін О. В., Петренко М. Г. Інтелектуальні системи управління технологічними процесами : монографія. Київ : Наукова думка, 2020. 356 с.
9. ДСТУ ІЕС 61131-3:2017. Програмовані логічні контролери. Мови програмування. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017.
10. ДСТУ ISO 15746-1:2019. Промислові автоматизовані системи та інтеграція. Інтерфейс застосування відкритих систем. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019.
11. Скакун В. А. Теорія автоматичного керування : підручник. Київ : Вища школа, 2016. 432 с.

```

> restart;
> T11:=840;
> T12:=850;
> T13:=860;
> T14:=870;
> T15:=880;
> tao:=S/a;
> tao1:=20;
> tao2:=40;
> tao3:=60;
> tao4:=80;
> tao5:=100;
> "Для зручності розрахунку, замість tetta записується t":
> T21:=(T11-120)*(1-exp(-t/tao1))+120;
> T22:=(T12-120)*(1-exp(-t/tao2))+120;
> T23:=(T13-120)*(1-exp(-t/tao3))+120;
> T24:=(T14-120)*(1-exp(-t/tao4))+120;
> T25:=(T15-120)*(1-exp(-t/tao5))+120;
> with(plots);
> p11:=plot(T21,t=0..400);
> p12:=plot(T22,t=0..400);
> p13:=plot(T23,t=0..400);
> p14:=plot(T24,t=0..400);
> p15:=plot(T25,t=0..400);
> k:=840;
> k1:=0.95*k;
> k2:=1.05*k;
> k0:=plot({k,k1,k2},t=0..400);
> display(p11,p12,p13,p14,p15,k0);

```



```

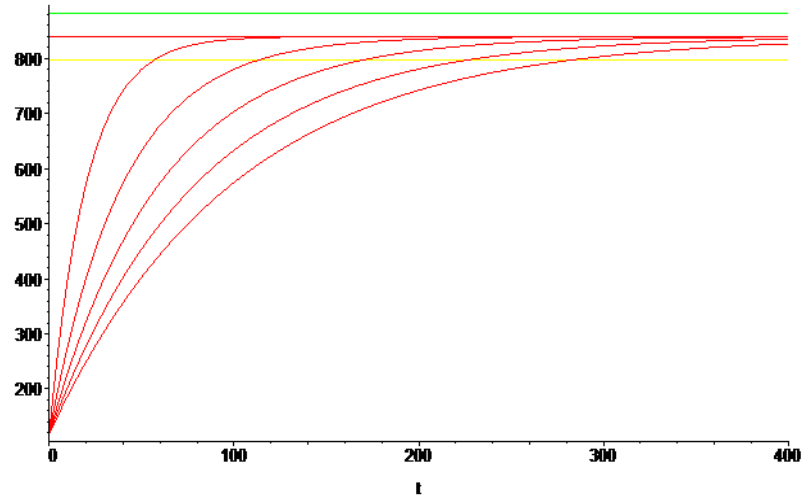
> "Збільшуємо tao. ,тобто в данному випадку збільшуємо площу
поверхні каталізатору. Температуру T1 залишаємо незмінною":
> restart;
> tao1:=20;
> tao2:=40;
> tao3:=60;
> tao4:=80;

```

```

> tao5:=100;
> T1:=840;
> T21:=(T1-120)*(1-exp(-t/tao1))+120;
> T22:=(T1-120)*(1-exp(-t/tao2))+120;
> T23:=(T1-120)*(1-exp(-t/tao3))+120;
> T24:=(T1-120)*(1-exp(-t/tao4))+120;
> T25:=(T1-120)*(1-exp(-t/tao5))+120;
> with(plots);
> p11:=plot(T21,t=0..400);
p12:=plot(T22,t=0..400);
p13:=plot(T23,t=0..400);
p14:=plot(T24,t=0..400);
p15:=plot(T25,t=0..400);
> k:=840;
> k1:=0.95*k;
> k2:=1.05*k;
> k0:=plot({k,k1,k2},t=0..400);
> display(p11,p12,p13,p14,p15,k0);

```



```

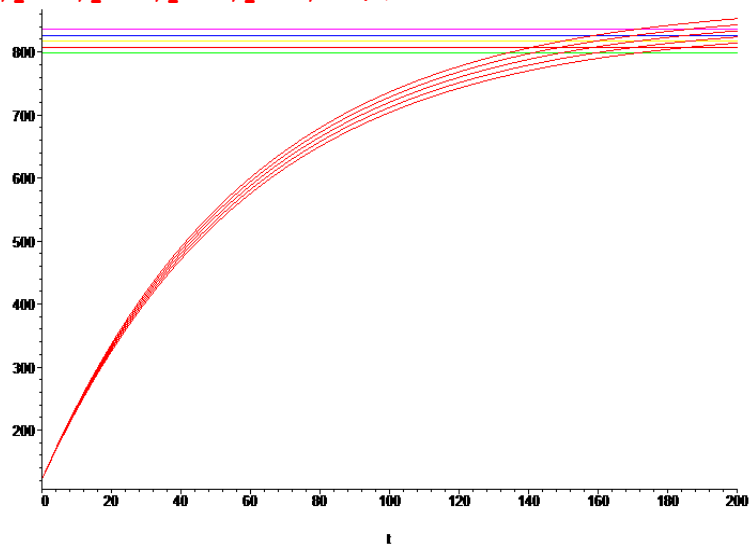
> display(p15,k0);
> "Змінюємо T1. Тао залишаємо незмінною":
> restart;
> tao3:=60;
> T11:=840;
> T12:=850;
> T13:=860;
> T14:=870;
> T15:=880;
> T21:=(T11-120)*(1-exp(-t/tao3))+120;
> T22:=(T12-120)*(1-exp(-t/tao3))+120;
> T23:=(T13-120)*(1-exp(-t/tao3))+120;
> T24:=(T14-120)*(1-exp(-t/tao3))+120;
> T25:=(T15-120)*(1-exp(-t/tao3))+120;
> with(plots);
> p11:=plot(T21,t=0..200);
p12:=plot(T22,t=0..200);
p13:=plot(T23,t=0..200);

```

```

p14:=plot(T24,t=0..200);
p15:=plot(T25,t=0..200);
> k1:=840;
> k11:=0.95*k1;
> k12:=1.05*k1;
> k2:=850;
> k21:=0.95*k2;
> k22:=1.05*k2;
> k3:=860;
> k31:=0.95*k3;
> k32:=1.05*k3;
> k4:=870;
> k41:=0.95*k4;
> k42:=1.05*k4;
> k5:=880;
> k51:=0.95*k5;
> k52:=1.05*k5;
> k0:=plot({k11,k21,k31,k41,k51},t=0..200);
> display(p11,p12,p13,p14,p15,k0);

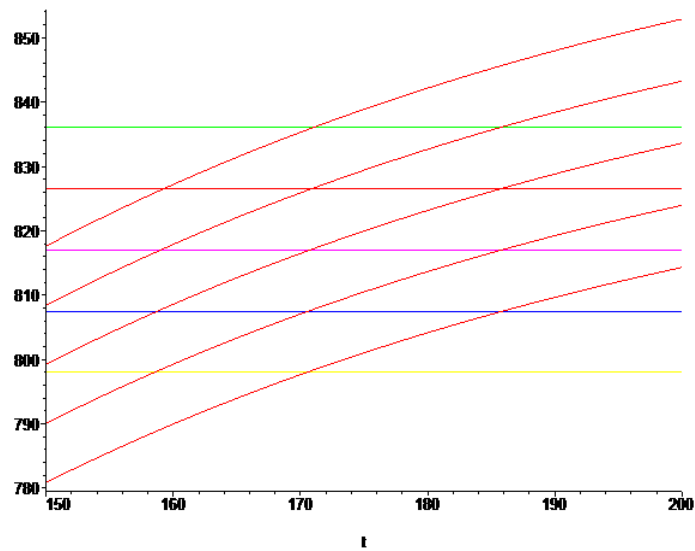
```



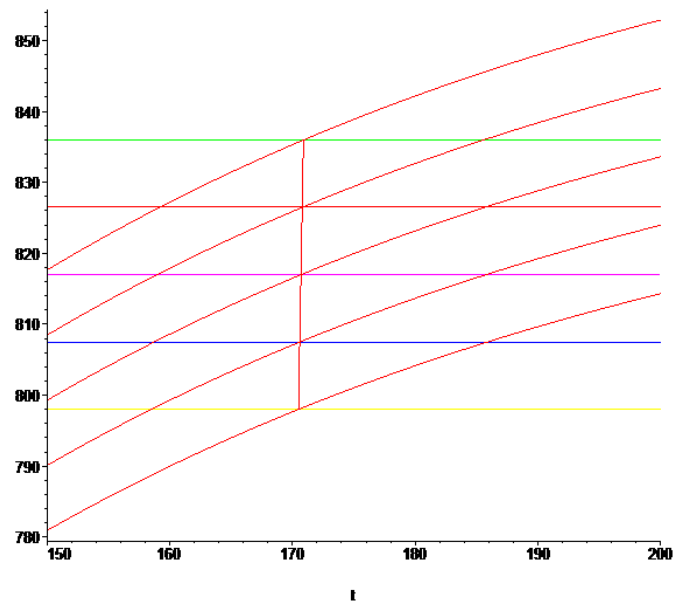
```

> p11:=plot(T21,t=150..200);
p12:=plot(T22,t=150..200);
p13:=plot(T23,t=150..200);
p14:=plot(T24,t=150..200);
p15:=plot(T25,t=150..200);
> k0:=plot({k11,k21,k31,k41,k51},t=150..200);
> display(p11,p12,p13,p14,p15,k0);

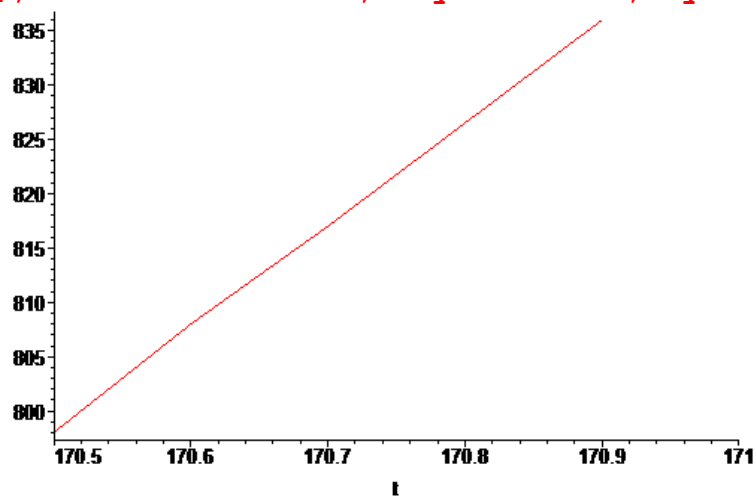
```



```
> m := plot([[170.5, 798], [170.6, 808], [170.7, 817], [170.8, 826.5], [170.9, 836]], t = 150 .. 200, style = line, symbol = circle);
> display(pl1,p12,p13,p14,p15,k0,m);
```



```
> plot([[170.5, 798], [170.6, 808], [170.7, 817], [170.8, 826.5], [170.9, 836]], t = 170.5 .. 171, style = line, symbol = circle);
```



```

> "ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ ОДНОКОНТУРНОЇ АСК":
> "РОЗРАХУНОК КРИВОЇ РОЗГОНУ ЕКВІВАЛЕНТНОГО ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ":
> "Передавальна функція замкненої системи керування":
> "W(s) := Wp(s) * W2(s) * W3(s) * W4(s) / (1 + Wp(s) * W2(s) * W3(s) * W4(s) * W5(s) * W6(s)";
    W(s) := Wp(s) * W2(s) * W3(s) * W4(s) / (1 + Wp(s) * W2(s) * W3(s) * W4(s) * W5(s) * W6(s);
> restart:
> W(s) := Wp(s) * W2(s) * W3(s) * W4(s) / (1 + Wp(s) * W2(s) * W3(s) * W4(s) * W5(s) * W6(s));

    W(s) := \frac{W_p(s) W_2(s) W_3(s) W_4(s)}{1 + W_p(s) W_2(s) W_3(s) W_4(s) W_5(s) W_6(s)}

> "Передавальна функція виконавчого механізму":
> W2(s) := k2 / (T2 * s + 1);

    W_2(s) := \frac{k_2}{T_2 s + 1}

> "Передавальна функція регулюючого органа":
> W3(s) := k3;

    W_3(s) := k_3

> "Передавальна функція технологічного об'єкта керування":
> W4(s) := k4 * (T43 * s + 1) / (T42^2 * s + T41 * s + 2.948);

    W_4(s) := \frac{k_4 (T_{43} s + 1)}{T_{42}^2 s + T_{41} s + 2.948}

> "Передавальна функція датчика":
> W5(s) := k5 / (T5 * s + 1);

    W_5(s) := \frac{k_5}{T_5 s + 1}

> "Передавальна функція проміжного перетворювача":
> W6(s) := k6;

    W_6(s) := k_6

> "Передавальна функція еквівалентного об'єкта керування":

    W_o(s) := W_2(s) * W_3(s) * W_4(s) * W_5(s) * W_6(s);

    W_o(s) := \frac{k_2 k_3 k_4 (T_{43} s + 1) k_5 k_6}{(T_2 s + 1) (T_{42}^2 s + T_{41} s + 2.948) (T_5 s + 1)}

> "Уведення параметрів еквівалентного об'єкта керування":
> k2 := 0.85;

    k_2 := 0.85

> k3 := 0.45;

    k_3 := 0.45

> k4 := -3.84;

    k_4 := -3.84

```

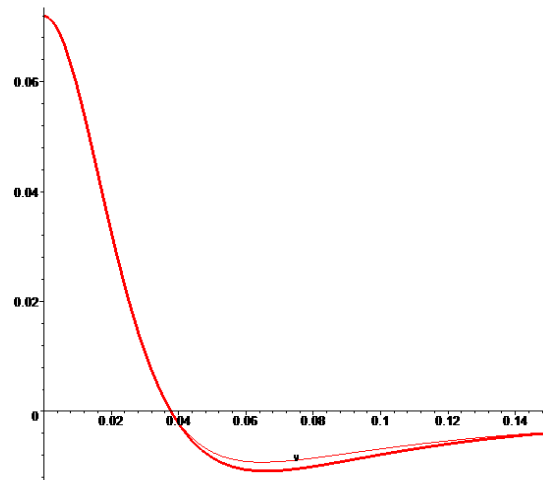
```

> k5:=0.9;
k5:=0.9
> k6:=0.95;
k6:=0.95
> T2:=10;
T2:=10
> T41:=48.18;
T41:=48.18
> T42:=24.09;
T42:=24.09
> T43:=11.72;
T43:=11.72
> T5:=15;
T5:=15
> "Заміна оператора Лапласа на оператор Фур'є":
> s:=I*v;
s:=v I
> Wo(s):=k2/(T2*s+1)*k3*k4*(T43*s+1)/(T42^2*s+T41*s+1)*k5/(T5*s+1)
*k6;
Wo(v I):=-\frac{1.255824000(11.72I v+1)}{(10I v+1)(628.5081I v+1)(15I v+1)}
> R:=Re(Wo(s));
R:=-1.255824000\Re\left(\frac{11.72I v+1}{(10I v+1)(628.5081I v+1)(15I v+1)}\right)
> "Уведення параметрів ідентифікованого об'єкта керування":
> k0:=.71948250e-1;
k0:=0.071948250
> T01:=52.0;
T01:=52.0
> T02:=26.525;
T02:=26.525
> "Заміна оператора Лапласа на оператор ФУР'Є":
> s:=I*v;
s:=v I

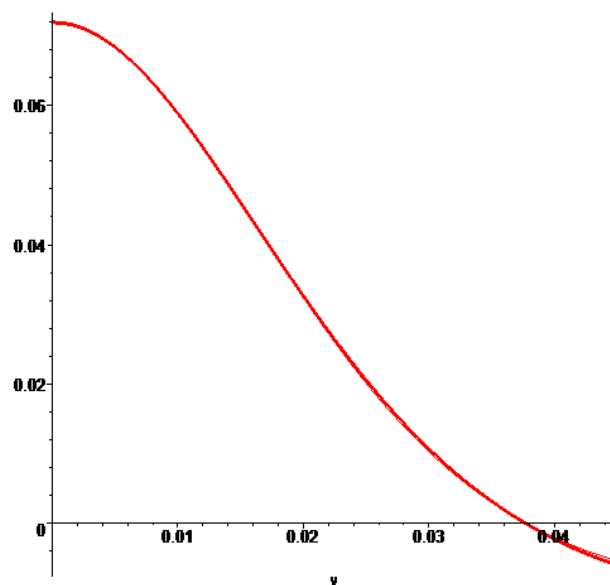
> "Передавальна функція ідентифікованого об'єкта керування":
> W01(s):=k0/(T02^2*s^2+T01*s+1);
W01(v I):=\frac{0.071948250}{-703.575625v^2+52.0I v+1}
> R01:=Re(W01(s));
R01:=0.071948250\Re\left(\frac{1}{-703.575625v^2+52.0I v+1}\right)
> with(inttrans):
> with(plots):
> b:=plot(R,v=0.0...0.15,thickness=3):

```

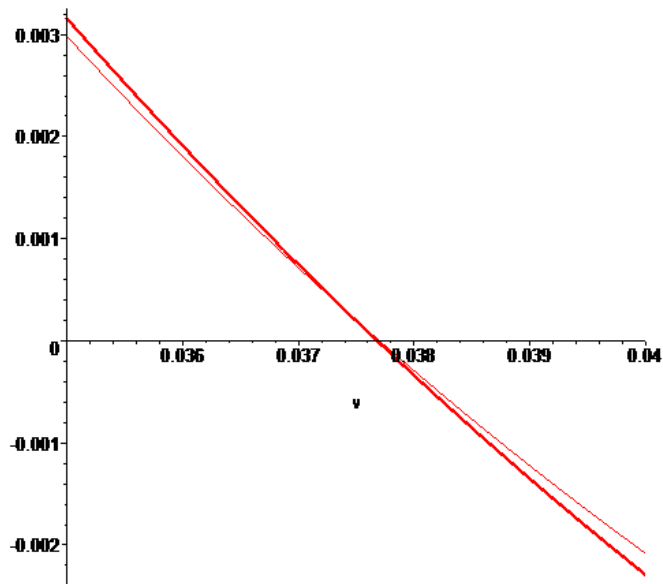
```
> b1:=plot(R01,v=0.0...0.15,thickness=1):
> display({b,b1});
```



```
> with(inttrans):
> with(plots):
> b:=plot(R,v=0.0...0.045,thickness=3):
> b1:=plot(R01,v=0.0...0.045,thickness=1):
> display({b,b1});
```



```
> with(inttrans):
> with(plots):
> b:=plot(R,v=0.035...0.04,thickness=3):
> b1:=plot(R01,v=0.035...0.04,thickness=1):
> display({b,b1});
```



```
> "РОЗРАХУНОК КРИВОЇ РОЗГОНУ ІДЕНТИФІКОВАНОГО ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ
МЕТОДОМ КВАДРАТУР":
> restart:
> k0:=.71948250e-1;
```

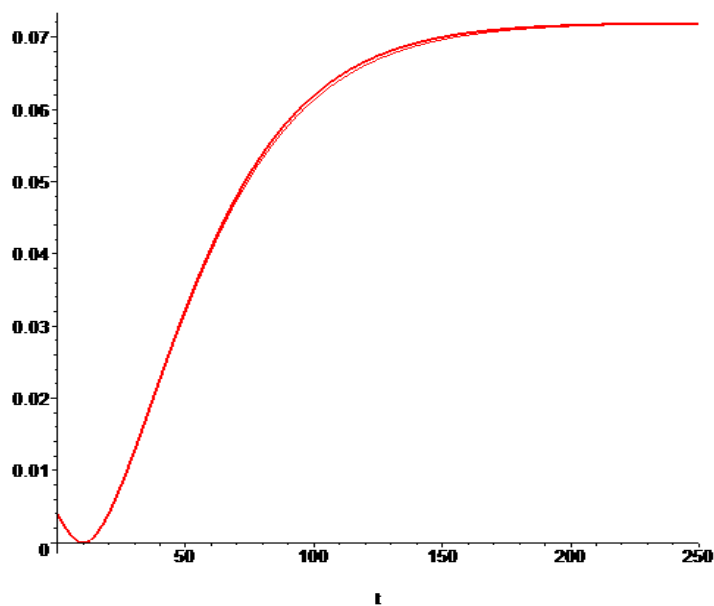
```

                                k0:=0.071948250
> T01:=52.0;
                                T01:=52.0
> T02:=26.525;
                                T02:=26.525
> T:=10;
                                T:=10
> "1.Розрахунок кривої розгону об'єкта при T01/T02 > 2":
> p1:=-T01/(2*T02^2)+sqrt((T01/(2*T02^2))^2-(1/T02)^2);
                                p1:=-0.03695409431+0.007463660898I
> p2:=-T01/(2*T02^2)-sqrt((T01/(2*T02^2))^2-(1/T02)^2);
                                p2:=-0.03695409431-0.007463660898I
> Y1:=k0*(1-(p2/(p2-p1))*exp(p1*abs(t-T))+(p1/(p2-
                                Y1:=0.071948250
                                -(0.03597412499+0.1781151671I)*e^((-0.03695409431+0.007463660898I)*(t-10))
                                -(0.03597412499-0.1781151671I)*e^((-0.03695409431-0.007463660898I)*(t-10))
> "2.Розрахунок кривої розгону об'єкта при T01/T02 < 2":
> a:=T01/(2*T02^2);
                                a:=0.03695409431
> v:=sqrt((1/T02^2-(T01/(2*T02^2))^2));
```

```

v:=0.007463660891
> Y2:=k0*(1-exp(-a*abs(t-T))*(cos(v*abs(t-T))+(a/v)*sin(v*abs(t-
T)))));
Y2:=0.071948250-0.071948250e(-0.03695409431|t-10|)
(cos(0.007463660891t-10)+4.951202207sin(0.007463660891t-10))
> "2.Розрахунок кривої розгону об'єкта при T01/T02 = 2":
> Y3:=k0*(1-(1+abs(t-T)/T02)*exp(-abs(t-T)/T02));
Y3:=0.071948250-0.071948250(1+0.03770028275|t-10|)e(-0.03770028275|t-10|)
> with(plots):
> b1:=plot(Y1,t=0.0...250,thickness=2):
> b2:=plot(Y2,t=0.0...250,thickness=2):
> b3:=plot(Y3,t=0.0...250,thickness=1):
> display({b1,b2,b3});

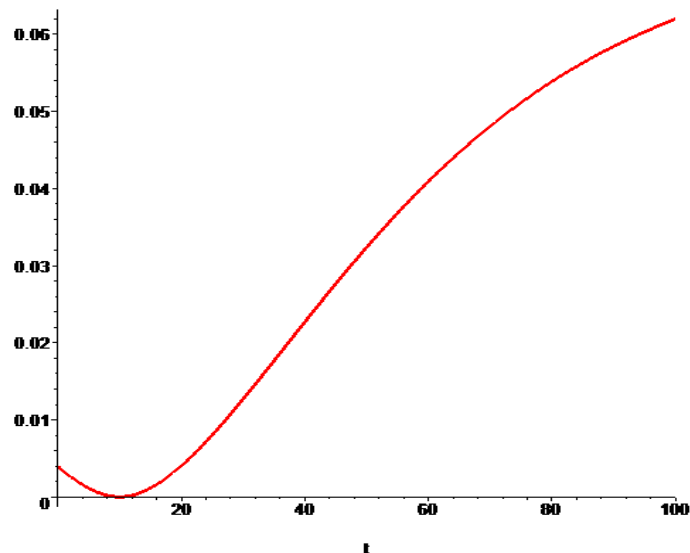
```



```

> with(plots):
> b1:=plot(Y1,t=0.0...100,thickness=3):
> b2:=plot(Y2,t=0.0...100,thickness=3):
> b3:=plot(Y3,t=0.0...100,thickness=3):
> display({b1});

```



```
> "ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ ОДНОКОНТУРНОЇ АСР З ПІ-РЕГУЛЯТОРОМ":
> restart:
> "1. РОЗРАХУНОК ОПТИМАЛЬНИХ НАЛАГОДЖУВАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ПІ-РЕГУЛЯТОРА":
```

```
> "1.1.Розрахунок параметрів регулятора виконувалося за методом
трикутника. По кривій розгону об'єкта керування визначалася
точка максимальної швидкості наростання перехідного процесу,
навколо якої будувався прямокутний трикутник і знаходилася
максимальна швидкість за формулою":
```

```
> F:=delta(y)/delta(t);
```

$$F := \frac{\delta(y)}{\delta(t)}$$

```
> delta(y) := 0.02;
```

$$\delta(y) := 0.02$$

```
> delta(t) := 15;
```

$$\delta(t) := 15$$

```
> F:=delta(y)/delta(t);
```

$$F := 0.001333333333$$

```
> "Максимальна швидкість перехідного процесу об'єкта дорівнює
0.001333 1/с":
```

```
> "1.2.Розрахунок оптимальних параметрів регулятора":
```

```
> "Час чистого запізнення об'єкта":
```

```
> T:=15;
```

$$T := 15$$

```
> Kp:=1.2*F*T;
```

$$Kp := 0.02400000000$$

```
> Ti:=2*T;
```

$$T_i := 30$$

> restart;

> "2. РОЗРАХУНОК ПЕРЕДАВАЛЬНОЇ ФУНКЦІЇ ОДНОКОНТУРНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ":

> W(s) := Wp(s) * W2(s) * W3(s) * W4(s) / (1 + Wp(s) * W2(s) * W3(s) * W4(s) * W5(s) * W6(s));

$$W(s) := \frac{W_p(s) W_2(s) W_3(s) W_4(s)}{1 + W_p(s) W_2(s) W_3(s) W_4(s) W_5(s) W_6(s)}$$

> "Передавальна функція ПІ-регулятора":

> Wp(s) := Kp + 1 / (s * Ti);

$$W_p(s) := K_p + \frac{1}{s T_i}$$

> "Передавальна функція виконавчого механізму":

> W2(s) := k2 / (T2 * s + 1);

$$W_2(s) := \frac{k_2}{T_2 s + 1}$$

> "Передавальна функція регулюючого органа":

> W3(s) := k3;

$$W_3(s) := k_3$$

> "Передавальна функція технологічного об'єкта керування":

> W4(s) := k4 * (T43 * s + 1) / (T42^2 * s + T41 * s + 2.948);

$$W_4(s) := \frac{k_4 (T_{43} s + 1)}{T_{42}^2 s + T_{41} s + 2.948}$$

> "Передавальна функція датчика":

> W5(s) := k5 / (T5 * s + 1);

$$W_5(s) := \frac{k_5}{T_5 s + 1}$$

> "Передавальна функція проміжного перетворювача":

> W6(s) := k6;

$$W_6(s) := k_6$$

> "Передавальна функція системи керування":

> W(s) := Wp(s) * W2(s) * W3(s) * W4(s) / (1 + Wp(s) * W2(s) * W3(s) * W4(s) * W5(s) * W6(s));

> "Уведення параметрів системи керування":

> Kp := 0.024;

$$K_p := 0.024$$

> Ti := 30;

$$T_i := 30$$

> k2 := 0.85;

$$k_2 := 0.85$$

> k3 := 0.45;

$$k_3 := 0.45$$

> k4 := -3.084;

$$k_4 := -3.084$$

> k5 := 0.9;

```

k5:=0.9
> k6:=0.95;
k6:=0.95
> T2:=10;
T2:=10
> T41:=48.18;
T41:=48.18
> T42:=24.09;
T42:=24.09
> T43:=11.72;
T43:=11.72
> T5:=15;
T5:=15
> "3.РОЗРАХУНОК ДЧХ ОДНОКОНТУРНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ":
> W(s):=Wp(s)*W2(s)*W3(s)*W4(s)/(1+Wp(s)*W2(s)*W3(s)*W4(s)*W5(s)*W
6(s));

```

$$W(s) := \left(K_p + \frac{1}{s T_i} \right) k_2 k_3 k_4 (T_{43} s + 1) \bigg/ \left((T_2 s + 1) (T_{42}^2 s + T_{41} s + 2.948) \right. \\ \left. \left(1 + \frac{\left(K_p + \frac{1}{s T_i} \right) k_2 k_3 k_4 (T_{43} s + 1) k_5 k_6}{(T_2 s + 1) (T_{42}^2 s + T_{41} s + 2.948) (T_5 s + 1)} \right) \right)$$

```

> R:=Re(W(s));

```

$$R := k_2 k_3 k_4 \Re \left(\left(K_p + \frac{1}{s T_i} \right) (T_{43} s + 1) \bigg/ \left((T_2 s + 1) (T_{42}^2 s + T_{41} s + 2.948) \right. \right. \\ \left. \left. \left(1 + \frac{\left(K_p + \frac{1}{s T_i} \right) k_2 k_3 k_4 (T_{43} s + 1) k_5 k_6}{(T_2 s + 1) (T_{42}^2 s + T_{41} s + 2.948) (T_5 s + 1)} \right) \right) \right)$$

```

> "3.РОЗРАХУНОК ДЧХ ІДЕНТИФІКОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ":
> "Заміна оператора Лапласа на оператор Фур'є":
> s:=I*v;

```

$$s := v I$$

```

> "Передавальна функція ідентифікованого об'єкта керування":
> T02:=124.378;

```

$$T02 := 124.378$$

```

> T01:=400;

```

$$T01 := 400$$

```

> k0:=1.1696;

```

$$k0 := 1.1696$$

```

> W0(s):=k0/(T02^2*s^2+T01*s+1);

```

$$W0(vI) := \frac{1.1696}{-15469.88688v^2 + 400Iv + 1}$$

```
> R1:=Re(W0(s));
```

$$R1 := 1.1696 \Re \left(\frac{1}{-15469.88688v^2 + 400Iv + 1} \right)$$

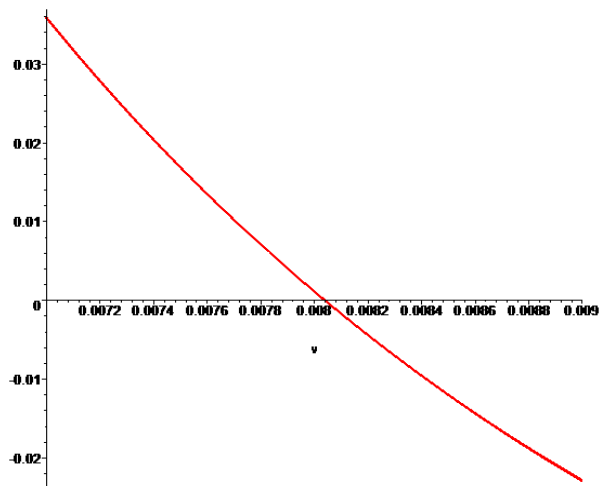
```
> with(inttrans):
```

```
> with(plots):
```

```
> b:=plot(R,v=0.007...0.009,thickness=3):
```

```
> b1:=plot(R1,v=0.007...0.009,thickness=1):
```

```
> display({b,b1});
```



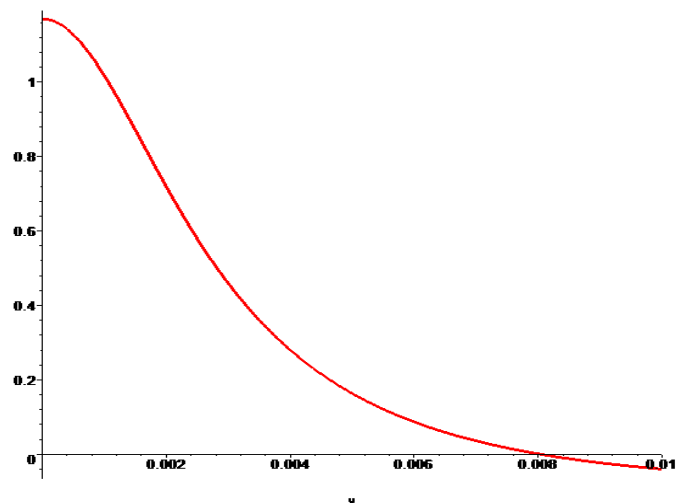
```
> with(inttrans):
```

```
> with(plots):
```

```
> b:=plot(R,v=0.00...0.01,thickness=3):
```

```
> b1:=plot(R1,v=0.00...0.01,thickness=1):
```

```
> display({b,b1});
```



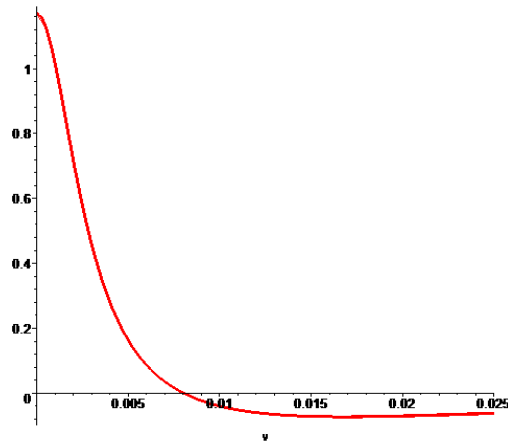
```
> with(inttrans):
```

```
> with(plots):
```

```
> b:=plot(R,v=0.0...0.025,thickness=3):
```

```
> b1:=plot(R1,v=0.0...0.025,thickness=1):
```

```
> display({b,b1});
```



```
> "РОЗРАХУНОК ПЕРЕХІДНОГО ПРОЦЕСУ ОДНОКОНТУРНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ  
З ПІ-РЕГУЛЯТОРОМ":
```

```
> "Уведення параметрів ідентифікованої АСР":
```

```
> T02:=124.378;
```

```
T02 := 124.378
```

```
> T01:=400;
```

```
T01 := 400
```

```
> k0:=1.1696;
```

```
k0 := 1.1696
```

```
> T:=10;
```

```
T := 10
```

```
> "1.Розрахунок кривої розгону об'єкта при T01/T02 > 2":
```

```
> p1:=-T01/(2*T02^2)+sqrt((T01/(2*T02^2))^2-(1/T02)^2);
```

```
p1 := -0.0028040979
```

```
> p2:=-T01/(2*T02^2)-sqrt((T01/(2*T02^2))^2-(1/T02)^2);
```

```
p2 := -0.0230525875
```

```
> Y1:=k0*(1-(p2/(p2-p1))*exp(p1*abs(t-T))+(p1/(p2-  
p1))*exp(p2*abs(t-T))):
```

```
> "2.Розрахунок кривої розгону об'єкта при T01/T02 < 2":
```

```
> a:=T01/(2*T02^2);
```

```
a := 0.0129283427
```

```
> w:=sqrt((1/T02^2-(T01/(2*T02^2))^2));
```

```
w := 0.01012424479
```

```
> Y2:=k0*(1-exp(-a*abs(t-T))*(cos(w*abs(t-T))+(a/w)*sin(w*abs(t-  
T)))));
```

```
Y2 := 1.1696- 1.1696e(-0.01292834276|t-10|)
```

```
(cosh(0.01012424479|t-10|)+1.276968606sinh(0.01012424479|t-10|))
```

```
> "3.Розрахунок кривої розгону об'єкта при T01/T02 =2":
```

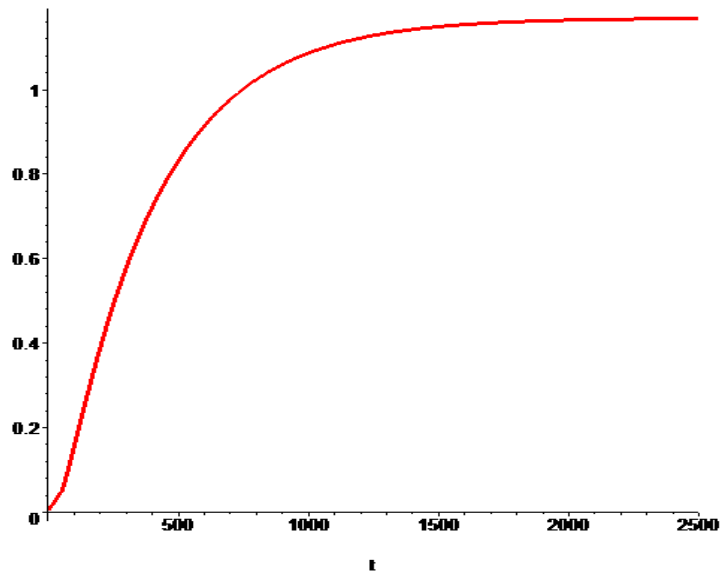
```
> Y3:=k0*(1-(1+abs(t-T)/T02)*exp(-abs(t-T)/T02));
```

```
Y3 := 1.1696- 1.1696(1+0.008040007075|t-10|)e(-0.008040007075|t-10|)
```

```

> with(plots) :
> b1:=plot(Y1,t=0.0...2500,thickness=3) :
> b2:=plot(Y2,t=0.0...2500,thickness=2) :
> b3:=plot(Y3,t=0.0...2500,thickness=1) :
> display({b1}) ;

```



```

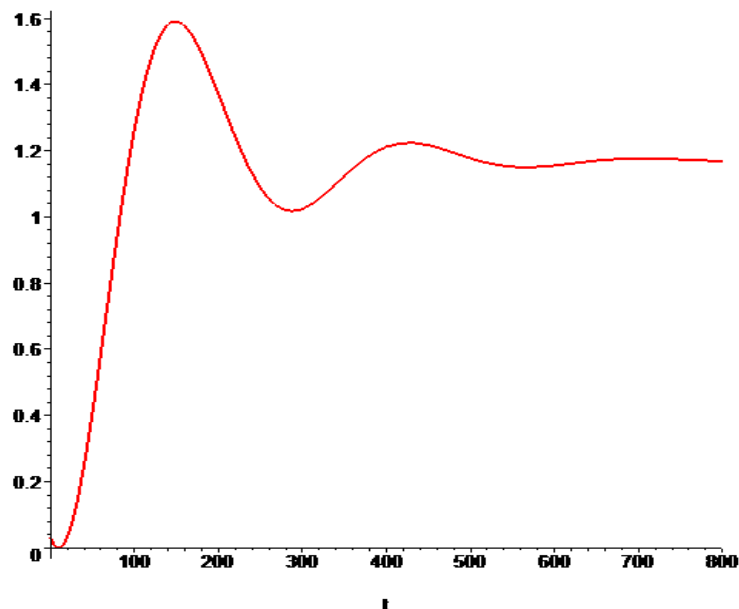
> restart:
> "РОЗРАХУНОК ПЕРЕХІДНОГО ПРОЦЕСУ ОДНОКОНТУРНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ
З ПІ-РЕГУЛЯТОРОМ" :
> "Уведення параметрів ідентифікованої АСР":
> T02:=42.0168;
                                T02 := 42.0168
> T01:=26.0;
                                T01 := 26.0
> k0:=1.1696;
                                k0 := 1.1696
> T:=10;
                                T := 10
> "1.Розрахунок кривої розгону об'єкта при T01/T02 > 2":
> p1:=-T01/(2*T02^2)+sqrt((T01/(2*T02^2))^2-(1/T02)^2);
                                p1 := -0.007363722355 0.02263218448
> p2:=-T01/(2*T02^2)-sqrt((T01/(2*T02^2))^2-(1/T02)^2);
                                p2 := -0.007363722355 0.02263218448
> Y1:=k0*(1-(p2/(p2-p1))*exp(p1*abs(t-T))+(p1/(p2-
p1))*exp(p2*abs(t-T))) :
> "2.Розрахунок кривої розгону об'єкта при T01/T02 < 2":
> a:=T01/(2*T02^2);

```

```

a:=0.00736372235!
> w:=sqrt((1/T02^2-(T01/(2*T02^2))^2));
w:=0.0226321844!
> Y2:=k0*(1-exp(-a*abs(t-T))*(cos(w*abs(t-T))+(a/w)*sin(w*abs(t-T)))));
Y2:=1.1696-1.1696e(-0.00736372235|t-10|)
(cos(0.0226321844|t-10|)+0.3253650730sin(0.0226321844|t-10|))
> "3.Розрахунок кривої розгону об'єкта при T01/T02 =2":
> Y3:=k0*(1-(1+abs(t-T)/T02)*exp(-abs(t-T)/T02));
Y3:=1.1696-1.1696(1+0.0238000038|t-10|)e(-0.02380000381|t-10|)
> with(plots):
> b1:=plot(Y1,t=0.0...800.0,thickness=3):
> b2:=plot(Y2,t=0.0...800.0,thickness=2):
> b3:=plot(Y3,t=0.0...800.0,thickness=1):
> display({b2});

```



```

> "РОЗРАХУНОК ПЕРЕХІДНОГО ПРОЦЕСУ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ З ПІ-РЕГУЛЯТОРОМ":
> "Уведення параметрів ідентифікованої АСК":
> T02:=124.378;
T02:=124.378
> T01:=400;
T01:=400
> k0:=1.1696;
k0:=1.1696

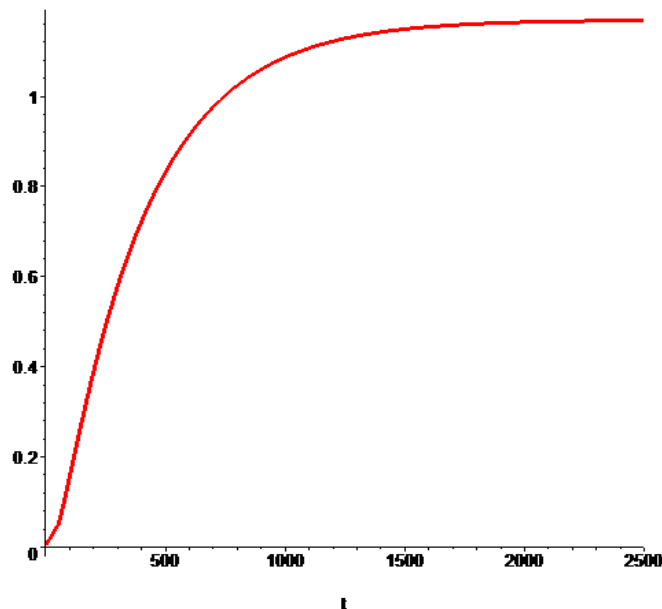
> T:=10;

```

```

T:=10
> "1.Розрахунок кривої розгону об'єкта при T01/T02 > 2":
> p1:=-T01/(2*T02^2)+sqrt((T01/(2*T02^2))^2-(1/T02)^2);
p1:=-0.0028040979
> p2:=-T01/(2*T02^2)-sqrt((T01/(2*T02^2))^2-(1/T02)^2);
p2:=-0.0230525875
> Y1:=k0*(1-(p2/(p2-p1))*exp(p1*abs(t-T))+(p1/(p2-
p1))*exp(p2*abs(t-T)));
> "2.Розрахунок кривої розгону об'єкта при T01/T02 < 2":
> a:=T01/(2*T02^2);
a:=0.0129283427
> w:=sqrt((1/T02^2-(T01/(2*T02^2))^2));
w:=0.01012424479
> Y2:=k0*(1-exp(-a*abs(t-T))*(cos(w*abs(t-T))+(a/w)*sin(w*abs(t-
T)))));
Y2:=1.1696-1.1696e(-0.01292834276|t-10|)
(cosh(0.01012424479|t-10|)+1.276968606sinh(0.01012424479|t-10|))
> "3.Розрахунок кривої розгону об'єкта при T01/T02 =2":
> Y3:=k0*(1-(1+abs(t-T)/T02)*exp(-abs(t-T)/T02));
Y3:=1.1696-1.1696(1+0.008040007075|t-10|)e(-0.008040007075|t-10|)
> with(plots):
> b1:=plot(Y1,t=0...2500,thickness=3):
> b2:=plot(Y2,t=0...2500,thickness=2):
> b3:=plot(Y3,t=0...2500,thickness=1):
> display({b1});

```



```

> restart;
> k2:=0.9;
> k3:=1.5;
> k4:=0.892;
> k5:=0.000077;
> k6:=0.9;
> T2:=25;
> T41:=1.148;
> T42:=0.0015483;
> T5:=0.05;
> "Уводимо параметри реологічного переходу":
> T11:=5;
> T12:=8;
> T13:=11;
> T14:=14;
> T15:=17;
> tao1:=5;
> tao2:=10;
> tao3:=15;
> tao4:=20;
> tao5:=25;
> W1p(s):=0.2752941176+1/(10*s);
> "Передавальна функція виконавчого механізму":
> W2(s):=k2/(T2*s+1);
> "Передавальна функція регулюючого органа":
> W3(s):=k3;
> "Передавальні функції технологічного об'єкта керування за тиском на основі теорії реологічних переходів":
> T21:=T13*(1-exp(-t/tao1));
> T22:=T13*(1-exp(-t/tao2));
> T23:=T13*(1-exp(-t/tao3));
> T24:=T13*(1-exp(-t/tao4));
> T25:=T13*(1-exp(-t/tao5));
> W4(s):=1/(T42^2*s+T41*s+1);
> W41(s):=T21/(T42^2*s+T41*s+1);
> W42(s):=T22/(T42^2*s+T41*s+1);
> W43(s):=T23/(T42^2*s+T41*s+1);
> W44(s):=T24/(T42^2*s+T41*s+1);
> W45(s):=T25/(T42^2*s+T41*s+1);
> "Передавальна функція датчика":
> W5(s):=k5/(T5*s+1);
> "Передавальна функція проміжного перетворювача":
> W6(s):=k6;
> "Передавальна функція еквівалентного об'єкта керування":
> W1o(s):=W2(s)*W3(s)*W4(s)*W5(s)*W6(s);

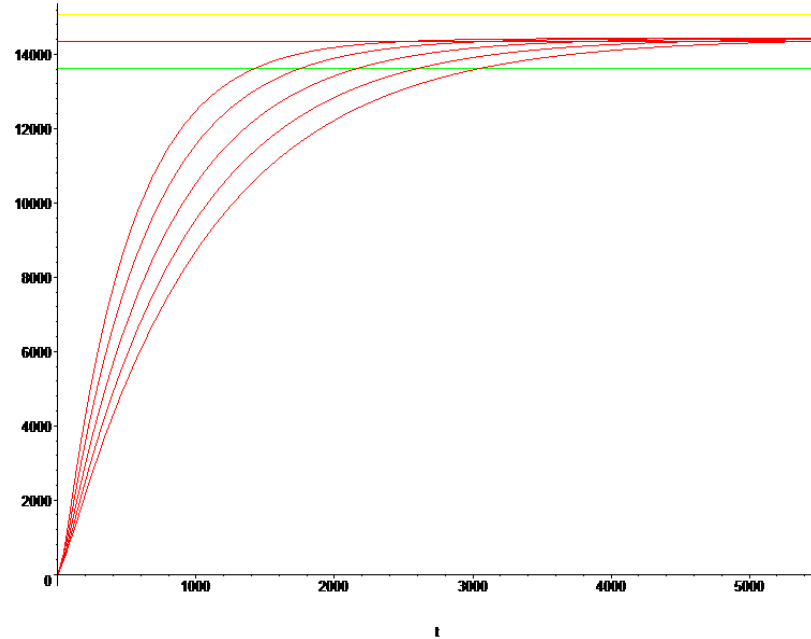
> k1:=14350;

```

```

> k11:=0.95*k1;
> k12:=1.05*k1;
> k0:=plot({k1,k11,k12},t=0..5500);
> display(p11,p12,p13,p14,p15,k0);

```



```

> p11:=plot(y1,t=0..3500);
p12:=plot(y2,t=0..3500);
p13:=plot(y3,t=0..3500);
p14:=plot(y4,t=0..3500);
p15:=plot(y5,t=0..3500);
> k1:=14350;
> k11:=0.95*k1;
> k12:=1.05*k1;
> k0:=plot({k1,k11,k12},t=0..3500);
> display(p11,p12,p13,p14,p15,k0);

```

