

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені Ігоря Сікорського»
(повне найменування вищого навчального закладу)

ФАКУЛЬТЕТ АВТОМАТИЗАЦІЇ, ПРОМИСЛОВОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА
ЕКОЛОГІЇ
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра технічних та програмних засобів автоматизації
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК 666.1.022.1

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ Віталій ЦАПАР
« ____ » _____ 2025р

Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра

за освітньою програмою «Технічні та програмні засоби автоматизації»

з напрямку підготовки 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка

на тему: Автоматизація процесу гідроочищення нафтових масел

Виконав: студент 2 курсу, групи ЛК-41мп
(шифр групи)

Балабанов Артем Віталійович
(прізвище, ім'я, по-батькові) (підпис)

Керівник доц. к.т.н. Ситніков О.В.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант _____
(назва розділу) (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що в цьому дипломному
проекті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань
Студент _____
(підпис)

Київ - 2025 року

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

Факультет автоматизації, промислової інженерії та робототехніки
(повна назва)

Кафедра технічних та програмних засобів автоматизації
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Напрямок підготовки 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
(код і назва)

Освітньо-професійна програма «Технічні та програмні засоби автоматизації»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Віталій ЦАПАР
(підпис) (ініціали, прізвище)

«__» _____ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту**

Балабанов Артем Віталійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Автоматизація процесу гідроочищення нафтових масел

керівник проекту _____
доц., к.т.н. Ситніков О.В.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «03» листопада 2025р. №4744-с.

2. Термін подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт дослідження процес гідроочищення нафтових масел _____

4. Вихідні дані: Схема автоматизації; система керування яка має забезпечувати перерегулювання не більше 20%, час перехідного процесу не більше заданим регламентом меж; параметри які підлягають керуванню: вихідна температура суміші із печі, витата пальног, витрата суміші на вході до печі

5. Перелік завдань, що потребують розробки: Дослідити процес отримання гідроочищення нафтових масел; розробка математичної моделі трубчастої печі як

технологічного об'єкту керування; спроектувати та дослідити систему керування піччю; дослідження надійності; розробка стартап проекту.

6. Орієнтовний перелік графічного(ілюстративного) матеріалу Графічні зображення об'єкту керування; схема процесу гідроочищення нафтових масел; перехідні характеристики об'єкту; зображення розробленої систем керування; перехідні процеси системи керування.

7. Консультанти розділів дисертації*

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

8. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Ознайомлення з теоретичним матеріалом		
2	Створення математичної моделі об'єкта		
3	Синтез системи керування		
4	Надійність системи		
5	Проектування схеми автоматизації		
6	Створення стартап проекту		

Студент _____

Артем БАЛАБАНОВ
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

Олексій СИТНИКОВ
(ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту.

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація записку об'ємом 69 сторінок, 29 рисунків, 13 таблиць, 1 креслення і 17 літературних джерел.

Основною метою дисертації є розробка системи автоматичного контролю хіміко технологічного процесу гідроочищення нафтових масел, для забезпечення мінімального втручання людини в роботу процесу, також збільшення ефективності використання робочого продукту та енергетичних ресурсів.

У дисертації розроблено схему автоматизації з технологічною сигналізацією та блокуванням роботи процесу.

Одним з основних апаратів, що забезпечує якість технологічного процесу являється трубчаста піч, для якої розроблені та досліджені математична модель статичного та динамічного режимів роботи та побудовано перехідні характеристики за каналами керування.

Проведено синтез системи керування для одноконтурної та каскадної системи керування. В дисертації представлено порівняльний аналіз отриманих результатів, виявлено в чому полягають переваги використання каскадної системи керування.

В дисертації представлено способи розрахунку ймовірностей безвідмовної роботи системи керування та принцип розрахунок безвідмовної роботи системи з різними видами резервування.

Розроблено стартап проекту, що дозволив виявити економічну доцільність прийнятих технічних рішень.

Ключові слова: нафта, нафтові масла, трубчаста піч, об'єкт керування, схема автоматизації, математична модель, статична характеристика, передатна функція, перехідна характеристика, канал керування, каскадна система, надійність, наробіток до відмови, регулятор.

ABSTRACT

Master's thesis note with a volume of 69 pages, 29 figures, 13 tables, 1 drawing and 17 literary sources.

The main purpose of the dissertation is to develop a system for automatic control of the chemical and technological process of hydrotreating petroleum oils, to ensure minimal human intervention in the process, as well as increasing the efficiency of using the working product and energy resources.

The dissertation has developed an automation scheme with technological signaling and blocking of the process.

One of the main devices that ensures the quality of the technological process is a tubular furnace, for which a mathematical model of static and dynamic operating modes has been developed and studied, and transient characteristics have been constructed along the control channels.

A control system has been synthesized for a single-loop and cascade control system. The dissertation presents a comparative analysis of the results obtained, revealing the advantages of using a cascade control system.

The dissertation presents methods for calculating the probabilities of failure-free operation of the control system and the principle of calculating the failure-free operation of the system with various types of redundancy.

A startup project was developed that allowed to identify the economic feasibility of the adopted technical solutions.

Keywords: oil, petroleum oils, tubular furnace, control object, automation scheme, mathematical model, static characteristic, transfer function, transient characteristic, control channel, cascade system, reliability, operating time before failure, regulator.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС УСТАНОВКИ ГІДРООЧИЩЕННЯ НАФТОВИХ МАСЕЛ.	8
1.1. Загальна характеристика процесу гідроочищення нафтових масел.....	8
1.2. Суть та особливості процесу.....	10
1.3. Аналіз існуючих систем автоматизації.....	11
1.4. Постановка задачі на дослідження.....	11
2. ОПИС СХЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ УСТАНОВКИ ГІДРООЧИЩЕННЯ НАФТОВИХ МАСЕЛ.....	12
2.1. Опис схеми автоматизації технологічного процесу установки гідроочищення нафтових масел	12
2.2. Контроль і регулювання параметрів	15
3. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ ОБ'ЄКТУ КЕРУВАННЯ.....	21
3.1. Дослідження об'єкту керування.....	21
3.2. Моделювання статичного режиму роботи печі	24
3.3. Моделювання динамічного режиму роботи печі.....	25
4. СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....	28
4.1. Синтез одноконтурної замкненої системи керування.....	28
4.1. Синтез каскадної системи керування.....	29
5. ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....	38
5.1. Способи розрахунку ймовірностей безвідмовної роботи.....	38
5.2. Розрахунок безвідмовної роботи системи з різними видами резервування та їх структурно-логічні схеми.....	56
6. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ.....	61
6.1. Поняття стартап-проекту.....	61
6.2. Технологічний аудит проекту.....	62
ВИСНОВКИ	67
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	68

ВСТУП

Нафтопереробна промисловість є однією з провідних галузей паливно-енергетичного комплексу, від ефективності якої значною мірою залежить рівень розвитку економіки держави. Виробництво нафтопродуктів, зокрема мастильних матеріалів, є складним багатостадійним процесом, який потребує точного дотримання технологічних режимів і високого рівня керованості [1]. Одним із ключових етапів отримання якісних мастильних матеріалів є процес гідроочищення нафтових масел, який дозволяє видалити небажані домішки — сірковмісні, азотисті, кисневі та металовмісні сполуки.

Гідроочищення є каталітичним процесом, що відбувається у присутності водню при високих температурах і тиску. Його основне призначення полягає у поліпшенні хімічного складу та фізико-хімічних властивостей масел, підвищенні стабільності при зберіганні й експлуатації, а також зниженні шкідливих викидів у навколишнє середовище [1]. У сучасних умовах, коли екологічні вимоги до нафтопродуктів стають дедалі жорсткішими, гідроочищення набуває особливо важливого значення.

Процес гідроочищення характеризується складною структурою, багатопараметричністю, інерційністю й сильною взаємозалежністю між параметрами, такими як температура, тиск, витрата водню, співвідношення «водень/сировина» тощо. Будь-які коливання цих параметрів можуть призвести до зниження активності каталізатора, погіршення якості очищеного продукту, а іноді — до аварійних ситуацій. Саме тому стабільність режиму та надійність контролю процесу мають вирішальне значення для безпечної та ефективної експлуатації установки [1].

Традиційні методи ручного керування технологічними процесами в нафтопереробній промисловості є малоефективними внаслідок суб'єктивного

впливу оператора, складності процесів і великої кількості контрольованих параметрів [2]. Відповідно, актуальним напрямом розвитку галузі є автоматизація технологічних процесів, що забезпечує високу точність підтримання режимів, оперативний контроль, зниження енергетичних витрат і підвищення якості кінцевої продукції.

Впровадження сучасних систем автоматизації дозволяє вирішувати низку завдань: підтримання оптимальних технологічних режимів у реальному часі, прогнозування відхилень параметрів, підвищення рівня безпеки, скорочення простоїв обладнання та оптимізацію витрат реагентів. Для цього використовуються програмовані логічні контролери (ПЛК), інтелектуальні сенсори, мікропроцесорні засоби керування та SCADA-системи, які забезпечують централізований моніторинг і керування установкою [3].

Метою дисертації виступає у розробці системи автоматизації установки гідроочищення нафтових масел з метою підвищення стабільності процесу, зниження впливу людського фактору, забезпечення високої якості кінцевого продукту та дотримання екологічних норм.

1. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС УСТАНОВКИ ГІДРООЧИЩЕННЯ НАФТОВИХ МАСЕЛ

1.1. Загальна характеристика процесу гідроочищення нафтових масел

Гідроочищення нафтових масел — це один із основних процесів вторинної нафтопереробки, спрямований на видалення з масляних фракцій сірковмісних, азотовмісних, кисневих, металовмісних та інших небажаних сполук. Процес відбувається в умовах підвищених температур (300–420 °С) і тиску (5–20 МПа) у присутності каталізатора та водню. Основною метою гідроочищення є покращення фізико-хімічних властивостей базових масел, зокрема їхньої термоокиснювальної стабільності, кольору, в'язкісного індексу та зменшення вмісту шкідливих домішок [1, 4].

Гідроочищення є ключовою стадією у виробництві високоякісних базових масел, з яких виготовляються мастильні матеріали для автомобільної, авіаційної, енергетичної та іншої техніки. У ході реакцій очищення відбуваються хімічні перетворення, такі як гідрогеноліз, гідрогенізація та гідрогенізаційне розщеплення зв'язків між атомами вуглецю, сірки, азоту й кисню [2,5].

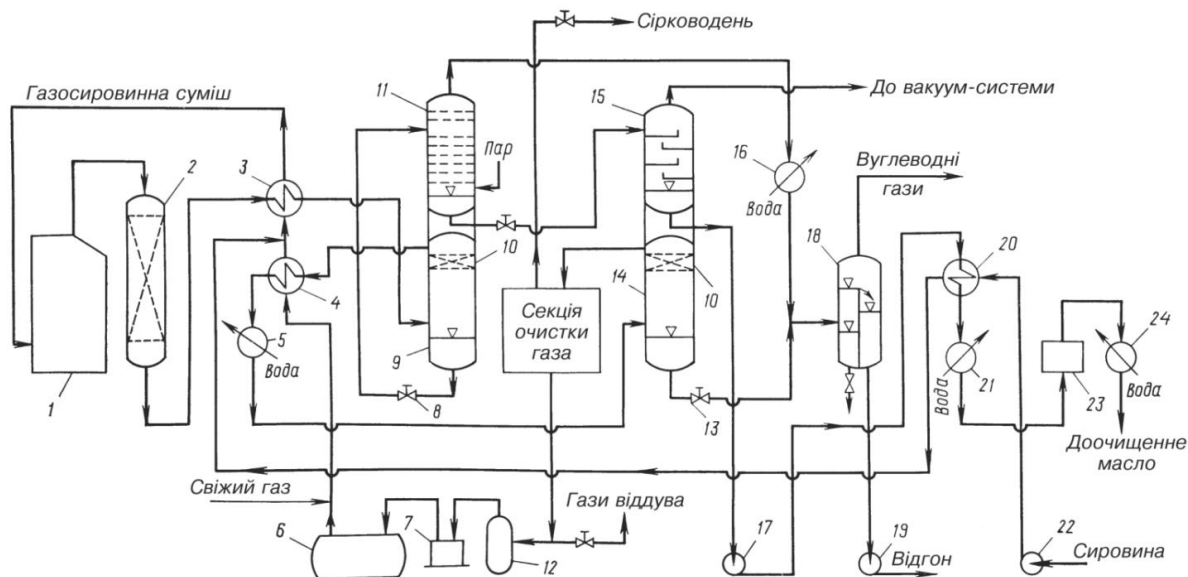


Рисунок 1.1 Технологічна схема установки гідроочищення нафтових масел

На схемі представлено: 1 – трубчаста піч; 2 – реактор; 3, 4, 20 – теплообмінники; 5, 21, 24 – холодильники; 6 – приймач; 7 – компресор; 8 – редукційний клапан; 9, 14 – високо- і низькотемпературний сепаратори високого тиску; 10 – краплевловлювач насадкового типу; 11 – відпарна колона; 12 – краплевідбійник; 13 – дросельний клапан; 15 – осушувальна колона; 16 – конденсатор-холодильник; 17, 19, 22 – насоси; 18 – сепаратор, 23 – фільтр.

Характерний режим роботи установки:

Залишковий тиск у колоні вакуумного осушення, кПа	13,3
Перепад тиску в реакторі, МПа	≈0,1
Об'ємна швидкість подачі сировини, год ⁻¹	1–3
Витрата циркуляційного газу на рідку сировину, м ³ /м ³	300–500
Концентрація Н ₂ у циркуляційному газі, % (об.)	Не менше 75
Каталізатор	Алюмокобальтмолібденовий або алюмонікельмолібденовий

Таблиця 1.1 Температура і тиск потоків в основних апаратах:

Продукт	Температура, °С	Надлишковий тиск, МПа
Газосировинна суміш на вході у змійовик печі	>160	–
у реактор	280–330	< 4,0
Газопродуктова суміш у сепараторі високотемпературному	200–230	3,5–3,8
низькотемпературному	≈40	3,5–3,8
Гідродоочищене масло перед фільтром	< 130	–
у відпарній колоні	190–225	≈0,3

Тривалість роботи каталізатора від 10 до 60 місяців, витрата його 0,01–0,03 кг на 1 т очищеної сировини. Каталізатор регенерують близько 1,5 доби, приблизно такий же час потрібно для виконання допоміжних операцій. На ряді установок відпрацьований каталізатор не регенерують, а заміняють свіжим [6].

1.2. Суть та особливості процесу

Процес гідроочищення полягає у взаємодії нафтової сировини з воднем у присутності каталізатора. Каталізатори, як правило, містять активні компоненти на основі оксидів кобальту, нікелю, молібдену або вольфраму, нанесених на алюмосилікатну основу. У результаті реакцій відбувається перетворення сірковмісних сполук у сірководень (H_2S), азотовмісних — у аміак (NH_3), а кисневмісних — у воду (H_2O) [3].

Основні етапи процесу [4]:

1. Підготовка сировини — очищення від механічних домішок, нагрівання до заданої температури.
2. Змішування з воднем — забезпечення необхідної концентрації водню для реакцій гідрогенізації.
3. Гідроочищення у реакторі — проходження сировини через шар каталізатора під тиском.
4. Відділення газової фази — видалення водню, сірководню та легких газів.
5. Охолодження та сепарація продуктів — розділення очищеного масла та газів.
6. Очищення циркуляційного водню — регенерація водню для повторного використання.

Для стабільної роботи установки важливим є підтримання певного співвідношення між температурою, тиском, витратою сировини й кількістю поданого водню. Навіть незначні відхилення можуть призвести до зниження ефективності очищення або до пошкодження каталізатора. Саме тому автоматизація процесу має вирішальне значення [6].

1.3. Аналіз існуючих систем автоматизації

На сучасних підприємствах нафтопереробки широко використовуються системи автоматизації на базі Siemens SIMATIC, Allen-Bradley, Schneider Electric, Honeywell Experion або Emerson DeltaV. Вони забезпечують комплексний підхід до контролю технологічного процесу, об'єднуючи всі етапи в єдину мережу. Такі системи дозволяють [7]:

- здійснювати онлайн-контроль параметрів технології;
- проводити автоматичну діагностику обладнання;
- реалізовувати резервування критичних елементів;
- забезпечувати дистанційне керування та аварійне відключення.

Проте для багатьох підприємств України актуальною проблемою залишається модернізація морально застарілих систем керування, які не відповідають сучасним вимогам до надійності, безпеки та енергоефективності [8]. Тому розробка нової системи автоматизації установки гідроочищення нафтових масел із використанням сучасних мікропроцесорних засобів керування є доцільною і своєчасною [9].

1.4. Постановка задачі на дослідження

Метою дисертації є розробка системи автоматичного контролю процесу гідрочищення нафтових масел. Це включає розробку математичної моделі об'єкту керування, синтез системи керування, створення схеми автоматизації .

Основні задачі дослідження включають:

- математичну модель об'єкту керування;
- синтез систем керування різних типів;
- створення схеми автоматизації технологічного процесу;
- перевірка надійності роботи системи;
- розробка стартап проекту.

2. ОПИС СХЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ УСТАНОВКИ ГІДРООЧИЩЕННЯ НАФТОВИХ МАСЕЛ

2.1. Опис схеми автоматизації технологічного процесу установки гідроочищення нафтових масел

Установка гідроочищення нафтових масел призначена для очищення масляних фракцій від небажаних домішок (сірковмісних, азотовмісних, кисневмісних сполук, смол, металів та поліциклічних ароматичних вуглеводнів), які негативно впливають на експлуатаційні властивості готових масел. У результаті процесу отримують високоякісні базові масла, що використовуються як сировина для виготовлення моторних, трансмісійних, індустріальних і гідравлічних мастильних матеріалів [7-9].

Технологічний процес гідроочищення умовно можна розділити на такі основні етапи [5]:

1. Підготовка сировини. Масляна сировина надходить із ємностей зберігання до підігрівальної секції, де очищається від механічних домішок і вологи.
2. Змішування з воднем. Після підігріву сировина подається до змішувача, де змішується з потоком водню, який надходить від компресора.
3. Гідроочищення у реакторі. Суміш сировини та водню надходить до реактора, заповненого шаром каталізатора. У реакторі відбуваються хімічні реакції гідрогенізації й гідрогенолізу домішок.
4. Відділення газів. Після реактора суміш надходить до сепаратора високого тиску, де видаляється газова фаза (водень, сірководень, легкі гази).
5. Охолодження та відділення продуктів. Рідинна фаза надходить до теплообмінників, де охолоджується, після чого відокремлюється очищене масло від залишкових газів і води.

6. Рециркуляція водню. Газова фаза проходить через блок очищення, де видаляються сірководень і домішки, після чого водень повертається в процес.

Установка працює безперервно. Усі основні параметри (температура, тиск, витрати) контролюються автоматично, що дозволяє підтримувати стабільний режим гідроочищення.

Характеристика основного технологічного обладнання [8, 10]

1. Реактор гідроочищення

- Тип: вертикальний циліндричний апарат із внутрішнім шаром каталізатора.
- Робоча температура: 340–400 °С.
- Робочий тиск: 10–16 МПа.
- Матеріал виготовлення: легована сталь, стійка до корозії в умовах високого тиску та температури.

2. Теплообмінники

- Призначення: нагрівання сировини перед реактором і охолодження продукту після реактора.
- Тип: кожухотрунні апарати.
- Особливість: використовують принцип рекуперації тепла для зниження енергоспоживання.

3. Компресор водню

- Забезпечує подачу водню під тиском до реактора.
- Тип: багатоступінчастий, з проміжним охолодженням.
- Регулювання продуктивності здійснюється автоматично залежно від навантаження системи.

4. Сепаратори високого та низького тиску

- Призначення: розділення газової та рідинної фаз після реакції.
- Обладнані датчиками тиску, рівня, температури.
- Оснащені автоматичними клапанами для скидання надлишкового тиску.

5. Насоси подачі сировини та продукту

- Забезпечують стабільну витрату масляної сировини й перекачування очищеного продукту.
- Тип: відцентрові, з електроприводом, оснащені датчиками контролю струму та захистом від «сухого ходу».

6. Блок очищення циркуляційного водню

- Призначений для видалення сірководню, аміаку та водяної пари з рециркуляційного газу.
- Включає абсорбери, фільтри та охолоджувачі.

Опис основних технологічних параметрів

Для стабільної роботи установки необхідно підтримувати такі параметри [9, 10]:

- Температура реактора: 360–400 °C — визначає швидкість хімічних реакцій;
- Тиск реактора: 10–16 МПа — впливає на ступінь насичення воднем;
- Співвідношення водню до сировини: 300–600 м³/т — визначає глибину очищення;
- Витрата сировини: залежить від продуктивності установки (1–10 т/год);
- Температура на виході продукту: 80–100 °C — для безпечного подальшого зберігання.

Контроль цих параметрів здійснюється системою автоматизації в реальному часі за допомогою датчиків і регуляторів, що забезпечує точність підтримання режимів та запобігає аваріям.

Масляна сировина з резервуарів надходить насосом до теплообмінників, де нагрівається за рахунок теплоти продуктів реакції. Потім вона спрямовується до печі, де нагрів доводиться до необхідного рівня. Далі потік сировини змішується з воднем у змішувачі та подається до реактора [8].

У реакторі при заданих умовах відбуваються реакції очищення [5]. Продукти реакції (суміш газів і рідин) надходять до сепаратора високого тиску, де виділяється газова фаза. Газ частково повертається у процес після очищення, а решта спрямовується на спалювання або подальше використання. Рідка фаза проходить через систему охолодження й надходить до сепаратора низького тиску, де відбувається остаточне розділення на очищене масло та газ.

Отримане очищене масло надходить у накопичувальну ємність, звідки подається на подальшу обробку або фасування.

2.2. Контроль і регулювання параметрів

Установка оснащується такими основними системами автоматичного регулювання:

- Регулювання температури у реакторі — шляхом зміни подачі палива до печі або подачі теплоносія;
- Регулювання тиску — через керування дросельними клапанами та компресором;
- Регулювання витрати водню — за сигналами з витратомірів;
- Контроль рівня в сепараторах — із використанням ємнісних або ультразвукових датчиків рівня;
- Аварійний захист — спрацьовує при перевищенні граничних параметрів (температури, тиску).

Метою автоматизації установки гідроочищення нафтових масел є підвищення ефективності, надійності та безпеки технологічного процесу за рахунок застосування сучасних технічних засобів контролю, регулювання та управління [10]. Автоматизація дозволяє забезпечити:

- стабільність параметрів технологічного режиму;
- зниження енергоспоживання;
- мінімізацію впливу людського фактора;
- запобігання аварійним ситуаціям;
- зручність контролю та діагностики обладнання.

Розроблена система автоматизації орієнтована на використання мікропроцесорних засобів управління (PLC) у поєднанні з SCADA-системою для моніторингу, збору даних і віддаленого керування [10].

Основні завдання автоматизації [5, 8]:

1. Контроль технологічних параметрів (температура, тиск, рівень, витрата).
2. Автоматичне регулювання основних змінних відповідно до заданих значень.
3. Захист і блокування обладнання при відхиленнях від допустимих меж.
4. Сигналізація аварійних станів та реєстрація подій.
5. Архівація даних і візуалізація технологічних процесів у реальному часі.

Вибір технічних засобів автоматизації

Датчики контролю параметрів

Контрольований параметр	Тип датчика	Модель / виробник	Діапазон вимірювання
Температура реактора	Термопара типу К	WIKA TC10	0...800 °C
Тиск у реакторі	П'єзорезистивний датчик	Siemens SITRANS P DSIII	0...20 МПа
Витрата сировини	Витратомір з ультразвуковим принципом	Endress+Hauser Proline	0,1–50 м³/год
Рівень у сепараторі	Ємнісний рівнемір	VEGA VEGACAL 64	0–5 м
Тиск водню	Електронний перетворювач тиску	Honeywell ST 3000	0...25 МПа

Усі первинні перетворювачі мають уніфікований вихідний сигнал 4–20 мА, що дозволяє легко підключати їх до контролера [10].

Виконавчі механізми

- Регулюючі клапани типу *SAMSON 3241* із електропневматичними позиціонерами.
- Електроприводи насосів з частотним регулюванням *ABB ACS580*, що забезпечують плавне керування витратою.
- Запірна арматура з дистанційним керуванням для аварійного відключення подачі сировини, водню та продуктів.

Контролер керування

Для реалізації системи управління обрано програмований логічний контролер Siemens SIMATIC S7-1200, який має [10]:

- достатню кількість аналогових і дискретних входів/виходів;
- підтримку промислових протоколів PROFINET, Modbus TCP;
- можливість інтеграції з SCADA-системою;
- високу надійність та гнучкість у налаштуванні.

Контролер виконує такі функції [10]:

- обробка сигналів від датчиків;
- формування команд на виконавчі механізми;
- реалізація алгоритмів регулювання (PID-контури);
- обмін даними зі SCADA-системою.

SCADA-система

Для моніторингу й диспетчерського керування використовується SCADA-система WinCC Professional, яка забезпечує:

- візуалізацію технологічного процесу у вигляді мнемосхеми;
- контроль у реальному часі параметрів процесу;
- ведення архівів даних і звітів;
- налаштування системи сигналізації та попереджень;
- захист доступу до системи через різні рівні авторизації (оператор, інженер, адміністратор).

Функціональна схема автоматизації [5, 8]

На основі аналізу технологічного процесу розроблено функціональну схему автоматизації, яка включає такі основні контури керування:

1. Контур регулювання температури печі.
 - Об'єкт: трубчаста піч.
 - Регульована величина: температура.
 - Вимірювання — термопара TE1, регулюючий клапан на подачі теплоносія.
 - Алгоритм: ПІД-регулювання з обмеженням швидкості зміни.
2. Контур регулювання тиску у реакторі.
 - Об'єкт: газовий простір реактора.
 - Регулюючий орган: дросельний клапан на лінії скидання газу.
 - Контролер підтримує тиск на рівні 14 МПа.
3. Контур регулювання витрати сировини.
 - Вимірювання — витратомір FI1.
 - Регулюючий орган — частотний перетворювач насоса.
 - Алгоритм: підтримання постійної витрати з урахуванням завдання з верхнього рівня (SCADA).
4. Контур контролю рівня у сепараторі.
 - Датчик рівня LI1.
 - Регулюючий клапан на лінії відведення рідкої фази.
 - При перевищенні рівня спрацьовує аварійна сигналізація й автоматичне закриття подачі.

Аварійний захист і сигналізація [10]

Система має багаторівневий захист:

- локальні аварійні сигнали на контролері;
- візуальні та звукові сигнали на операторській панелі;
- автоматичне зупинення установки у разі критичного перевищення температури або тиску.

Дані аварійних подій реєструються у SCADA для подальшого аналізу причин і дій персоналу.

Програмна реалізація алгоритмів

Програмне забезпечення контролера побудовано за модульним принципом.

Основні програмні блоки [10]:

- AI_Processing — обробка аналогових сигналів;
- PID_Control — ПІД-регулювання для кожного контуру;
- Alarm_Manager — моніторинг аварій і передавання сигналів у SCADA;
- Data_Exchange — комунікація між PLC і SCADA через PROFINET.

Переваги запропонованої системи полягають у наступному [10]:

- Підвищення стабільності та безпеки процесу гідроочищення;
- Скорочення часу на регулювання параметрів;
- Зниження витрат на обслуговування обладнання;
- Покращення якості готової продукції;
- Можливість інтеграції з корпоративними системами управління підприємством (MES, ERP).

3. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ ОБ'ЄКТУ КЕРУВАННЯ

3.1. Дослідження об'єкту керування

Об'єкт — трубчата (повітрянозаповнена / продуктозаповнена) піч, яка нагріває продукт (плинна сировина або газ) за рахунок подачі палива в пальник; завдання — описати її теплову динаміку, отримати просту лінійну модель для керування температурою, та спроектувати систему керування (швидкий внутрішній контур — подача палива / витрата, повільний зовнішній — температура) [11].

Типові припущення мо делювання:

- Піч описується усередненою (однозонною) моделью з однією температурною змінною $T(t)$ (температура стінки/газу чи продукту — залежно від задачі).
- Підведена тепла потужність Q_{in} (кВт) керується шляхом зміни подачі палива/витрати газу/інтенсивності горіння.
- Тепловіддача в навколишнє середовище і теплопередача продукту описуються лінійною тепловою витратою $Q_{loss} = U(T - T_a)$.
- Теплова інерція — за рахунок сумарної маси і теплоємності печі та продукту: $C = m c_p C = m c_p C = m c_p$.
- Внутрішня робоча зона має запізнювання реакції на зміну Q_{in} (транспортний час запізнення), наприклад через час розгону пальника, теплові заряди, циркуляцію газів.

Енергетичний баланс однозонної моделі [12]:

$$CdT(t)dt=Q_{in}(t)-Q_{loss}(t)+Q_d(t), C \frac{dT(t)}{dt} = Q_{in}(t) - Q_{loss}(t) + Q_d(t),$$

$$C \frac{dT(t)}{dt} = Q_{in}(t) - Q_{loss}(t) + Q_d(t),$$

Де $C = m c_p C = m c_p C = m c_p$ — сумарна теплова інерція (Дж/°C або кДж/°C),

$Q_{in}(t)$ $Q_{in}(t)$ $Q_{in}(t)$ — корисна теплова потужність, що потрапила у зону (кВт → перерахувати у кДж/с згідно одиниць),

$Q_{loss}(t) = U(T(t) - T_a(t))$ $Q_{loss}(t) = U(T(t) - T_a(t))$ $Q_{loss}(t) = U(T(t) - T_a(t))$ — тепловтрати (U — коефіцієнт, кВт/°C),

$Q_d(t)$ $Q_d(t)$ $Q_d(t)$ — додаткові джерела/поглиначі тепла (наприклад, тепло реакцій, зміна масової витрати продукту) — розглядається як збурення.

В класичній формі [12]:

$$CT'(t) + UT(t) = Q_{in}(t) + UT_a(t) + Q_d(t). C \dot{T}(t) + U T(t) = Q_{in}(t) + U T_a(t) + Q_d(t).$$

$$CT'(t) + UT(t) = Q_{in}(t) + UT_a(t) + Q_d(t).$$

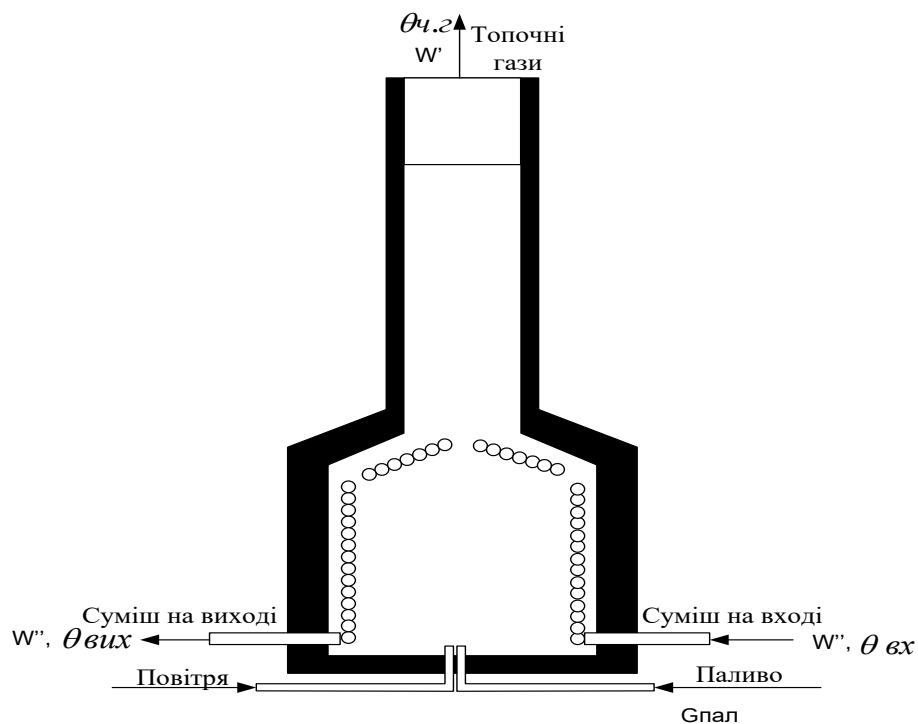


Рисунок 3.1 Розрахункова схема об'єкту керування

Наведено основні параметри трубчастої печі:

$G_{\text{пал}}$ – витрата палива;

$W', \Theta_{\text{чг}}$ – об'ємна витрата та температура топочних газів;

$W'', \Theta_{\text{вх}}, \Theta_{\text{вих}}$ – об'ємна витрата суміші та відповідно температура суміші на вході та виході змійовиків печі.

Під час моделюванні об'єкту керування в дисертації було зроблено ряд припущень [12] :

1. Апарат являє собою, об'єкт з ідеальним перемішуванням в зоні топки та димоході, що зумовлено необхідністю турбулентності потоку, яка дає більше ККД теплопередачі.
2. Паливо згорає повністю.
3. Система керування співвідношенням витратою «газ-повітря» дає ідеальний результат.
4. Втрати теплотив на зовні, не перевищує 10%.
5. Склад паливної суміші постійна величина сталий .
6. Витрата суміші є сталою величиною.

Основною задачею є керування вихідної суміші з печі, відповідно:

Вихід $\Theta_{\text{вих}}$, температура суміші на виході з печі.

Вхід $G_{\text{пал}}$, витрата палива на вході до пальників;

Збурююча дія, $\Theta_{\text{вх}}$, температура суміші на вході в трубчасту піч.

Структурна схема ТОК зображена на рис 3.2 [13].

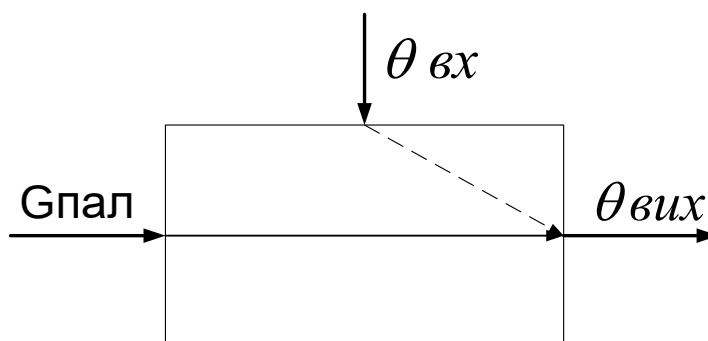


Рисунок 3.2 – Структурно-параметрична схема печі

3.2. Моделювання статичного режиму печі

Представлено тепловий баланс для топки печі [11]:

$$Q_{\text{згор}} - Q_{\text{тп}} - Q_{\text{тг}} - Q_{\text{нс}} = 0,$$

де $Q_{\text{згор}} = q \cdot \rho \cdot G_{\text{пал}}$ – кількість тепла, що виділяється при згоранні пального;

$Q_{\text{тп}} = \alpha \cdot F \cdot (\Theta_{\text{чг}}(t) - \Theta_{\text{вх}}(t))$ – кількість тепла витраченого на теплообмін, що віддається до сировини, α – коефіцієнт теплопередачі, F – площа поверхні теплообміну;

$Q_{\text{тг}} = W' \cdot \rho' \cdot C' \cdot \Theta_{\text{чг}}$ – кількість тепла, що виходить із відпрацьованими топочними газами;

$Q_{\text{нс}}$ – втрати тепла в навколишнє середовище. (не більше 10%).

Розглянемо відповідний тепловий баланс для суміші:

$$Q_{\text{с_вх}} + Q_{\text{тп}} - Q_{\text{с_вих}} = 0,$$

$$\text{Де } Q_{\text{с_вх}} = W'' \cdot \rho'' \cdot C'' \cdot \Theta_{\text{вх}}$$

$$Q_{\text{с_вих}} = W'' \cdot \rho'' \cdot C'' \cdot \Theta_{\text{вих}}$$

$$\begin{cases} 0.9 \cdot [q \cdot \rho \cdot G_{\text{пал}} - \alpha \cdot F \cdot (\Theta_{\text{чг}} - \Theta_{\text{вх}}) - W' \cdot \rho' \cdot C' \cdot \Theta_{\text{чг}}] = 0 \\ W'' \cdot \rho'' \cdot C'' \cdot (\Theta_{\text{вх}} - \Theta_{\text{вих}}) + \alpha \cdot F \cdot (\Theta_{\text{чг}} - \Theta_{\text{вх}}) = 0 \end{cases}$$

$$\Theta_{\text{чг}} = \frac{q \cdot \rho \cdot G_{\text{пал}} + \alpha \cdot F \cdot \Theta_{\text{вх}}}{W' \cdot \rho' \cdot C' + \alpha \cdot F}$$

$$\Theta_{\text{вих}} = \frac{W'' \cdot \rho'' \cdot C'' \cdot \Theta_{\text{вх}} + \alpha \cdot F \cdot (\Theta_{\text{чг}} - \Theta_{\text{вх}})}{W'' \cdot \rho'' \cdot C''}$$

$$\begin{aligned} \Theta_{\text{вих}} = & \frac{[(W'' \cdot \rho'' \cdot C'' - \alpha \cdot F) \cdot (W'' \cdot \rho'' \cdot C'' + \alpha \cdot F) + (\alpha \cdot F)] \cdot \Theta_{\text{вх}}}{W'' \cdot \rho'' \cdot C'' \cdot (W' \cdot \rho' \cdot C' + \alpha \cdot F)} \\ & + \frac{\alpha \cdot F \cdot q \cdot \rho \cdot G_{\text{пал}}}{W'' \cdot \rho'' \cdot C'' \cdot (W' \cdot \rho' \cdot C' + \alpha \cdot F)} \end{aligned}$$

Отриманий результат являє собою рівняння статички трубчастої печі.

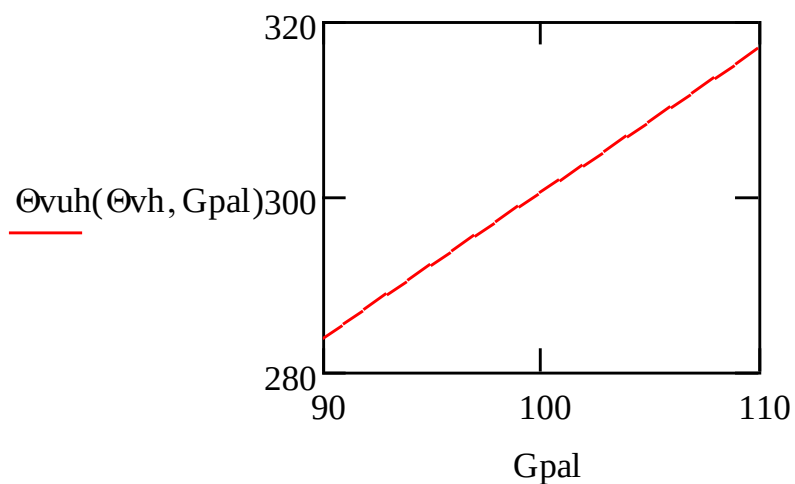


Рисунок 3.3 – Статична характеристика за каналом керування

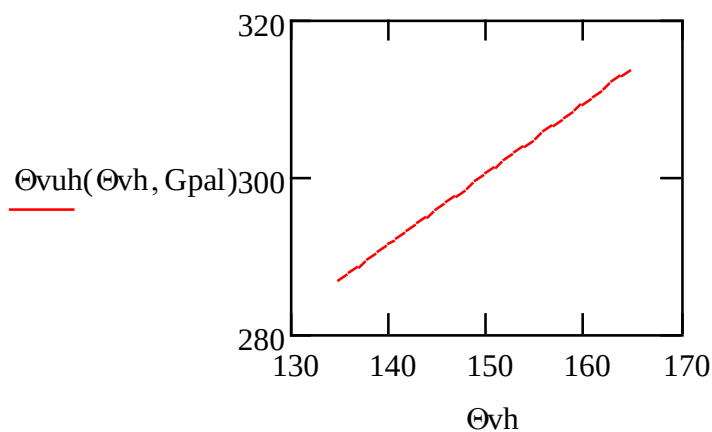


Рисунок 3.4 – Статична характеристика за каналом збурення каналу

3.3. Моделювання динамічного режиму печі

Рівняння динаміки печі та сировини відповідно до отриманого вище рівняння статички [11]:

$$0.9 \cdot [q \cdot \rho \cdot G_{\text{пал}}(t) - \alpha \cdot F \cdot (\Theta_{\text{чг}}(t) - \Theta_{\text{вх}}(t)) - W' \cdot \rho' \cdot C' \cdot \Theta_{\text{чг}}(t)] = V' \cdot \rho' \cdot C' \cdot \frac{d\Theta_{\text{чг}}}{dt}$$

$$W'' \cdot \rho'' \cdot C'' \cdot (\Theta_{\text{вх}}(t) - \Theta_{\text{вих}}(t)) + \alpha \cdot F \cdot (\Theta_{\text{чг}}(t) - \Theta_{\text{вх}}(t)) = V'' \cdot \rho'' \cdot C'' \cdot \frac{d\Theta_{\text{вих}}}{dt}$$

Провидимо лінеаризацію та виконаємо перетворення за Лапласом :

$$0.9 \cdot [q \cdot \rho \cdot \Delta G_{\text{пал}} - \alpha \cdot F \cdot (\Delta \Theta_{\text{чг}} - \Delta \Theta_{\text{вх}}) - W' \cdot \rho' \cdot C' \cdot \Delta \Theta_{\text{чг}}] = V' \cdot \rho' \cdot C' \cdot p \cdot \Delta \Theta_{\text{чг}}$$

$$W'' \cdot \rho'' \cdot C'' \cdot (\Delta \Theta_{\text{вх}} - \Delta \Theta_{\text{вих}}) + \alpha \cdot F \cdot (\Delta \Theta_{\text{чг}} - \Delta \Theta_{\text{вх}}) = V'' \cdot \rho'' \cdot C'' \cdot p \cdot \Delta \Theta_{\text{вих}}$$

$$0.9 \cdot [q \cdot \rho \cdot \Delta G_{\text{пал}}(p) - \alpha \cdot F \cdot (\Delta \Theta_{\text{чг}}(p) - \Delta \Theta_{\text{вх}}(p)) - W' \cdot \rho' \cdot C' \cdot \Delta \Theta_{\text{чг}}(p)] = V' \cdot \rho' \cdot C' \cdot p \cdot \Delta \Theta_{\text{чг}}(p)$$

$$W'' \cdot \rho'' \cdot C'' \cdot (\Delta \Theta_{\text{вх}}(p) - \Delta \Theta_{\text{вих}}(p)) + \alpha \cdot F \cdot (\Delta \Theta_{\text{чг}}(p) - \Delta \Theta_{\text{вх}}(p)) = V'' \cdot \rho'' \cdot C'' \cdot p \cdot \Delta \Theta_{\text{вих}}(p)$$

$$0.9 \cdot [q \cdot \rho \cdot \Delta G_{\text{пал}}(p) + \alpha \cdot F \cdot \Delta \Theta_{\text{вх}}(p)] = V' \cdot \rho' \cdot C' \cdot p \cdot \Delta \Theta_{\text{чг}}(p) + W' \cdot \rho' \cdot C' \cdot \Delta \Theta_{\text{чг}}(p) + \alpha \cdot F \cdot \Delta \Theta_{\text{чг}}(p)$$

$$\Delta \Theta_{\text{чг}}(p) = \frac{0.9 \cdot [q \cdot \rho \cdot \Delta G_{\text{пал}}(p) + \alpha \cdot F \cdot \Delta \Theta_{\text{вх}}(p)]}{V' \cdot \rho' \cdot C' \cdot p + 0.9 \cdot W' \cdot \rho' \cdot C' + 0.9 \cdot \alpha \cdot F}$$

$$W'' \cdot \rho'' \cdot C'' \cdot \Delta \Theta_{\text{вх}}(p) + \alpha \cdot F \cdot (\Delta \Theta_{\text{чг}}(p) - \Delta \Theta_{\text{вх}}(p)) = V'' \cdot \rho'' \cdot C'' \cdot p \cdot \Delta \Theta_{\text{вих}}(p) + W'' \cdot \rho'' \cdot C'' \cdot \Delta \Theta_{\text{вих}}(p)$$

$$\Delta \Theta_{\text{вих}}(p) = \frac{W'' \cdot \rho'' \cdot C'' \cdot \Delta \Theta_{\text{вх}}(p) + \alpha \cdot F \cdot (\Delta \Theta_{\text{чг}}(p) - \Delta \Theta_{\text{вх}}(p))}{V'' \cdot \rho'' \cdot C'' \cdot p + W'' \cdot \rho'' \cdot C''}$$

$$\Delta \Theta_{\text{вих}}(p) = \frac{W'' \cdot \rho'' \cdot C'' \cdot \Delta \Theta_{\text{вх}}(p)}{V'' \cdot \rho'' \cdot C'' \cdot p + W'' \cdot \rho'' \cdot C''}$$

$$+ \frac{\alpha \cdot F \cdot \left(\frac{0.9 \cdot [q \cdot \rho \cdot \Delta G_{\text{пал}}(p) + \alpha \cdot F \cdot \Delta \Theta_{\text{вх}}(p)]}{V' \cdot \rho' \cdot C' \cdot p + 0.9 \cdot W' \cdot \rho' \cdot C' + 0.9 \cdot \alpha \cdot F} - \Delta \Theta_{\text{вх}}(p) \right)}{V'' \cdot \rho'' \cdot C'' \cdot p + W'' \cdot \rho'' \cdot C''}$$

$$\Delta \Theta_{\text{вих}}(p) =$$

$$= \frac{\Delta \Theta_{\text{вх}}(p) \cdot \left(\frac{V' \cdot \rho' \cdot C'}{W'' \cdot \rho'' \cdot C''} \cdot p + \frac{0.9 \cdot W' \cdot \rho' \cdot C' + 0.9 \cdot \alpha \cdot F}{W'' \cdot \rho'' \cdot C''} + 0.9 \cdot (\alpha \cdot F)^2 \right)}{(V'' \cdot \rho'' \cdot C'' \cdot p + W'' \cdot \rho'' \cdot C'') \cdot (V' \cdot \rho' \cdot C' \cdot p + 0.9 \cdot W' \cdot \rho' \cdot C' + 0.9 \cdot \alpha \cdot F)}$$

$$+ \frac{0.9 \cdot \alpha \cdot F \cdot q \cdot \rho \cdot \Delta G_{\text{пал}}(p)}{(V'' \cdot \rho'' \cdot C'' \cdot p + W'' \cdot \rho'' \cdot C'') \cdot (V' \cdot \rho' \cdot C' \cdot p + 0.9 \cdot W' \cdot \rho' \cdot C' + 0.9 \cdot \alpha \cdot F)}$$

Передатна функція за каналом керування

$$WGpal\theta vuh(p) =$$

$$= \frac{0.9 \cdot \alpha \cdot F \cdot q \cdot \rho}{(V'' \cdot \rho'' \cdot C'' \cdot p + W'' \cdot \rho'' \cdot C'') \cdot (V' \cdot \rho' \cdot C' \cdot p + 0.9 \cdot W' \cdot \rho' \cdot C' + 0.9 \cdot \alpha \cdot F)}$$

$$W(p) := \frac{K}{A2 \cdot p^2 + A1 \cdot p + 1}$$

Розрахунок складових аперіодичної ланки другого порядку

$$T1 := \frac{A1}{2} + \sqrt{\frac{A1^2}{4} - A2} \quad T2 := A1 - T1$$

$$K=0.175; T1=106,84; T2=10$$

Перехідна характеристика об'єкту керування

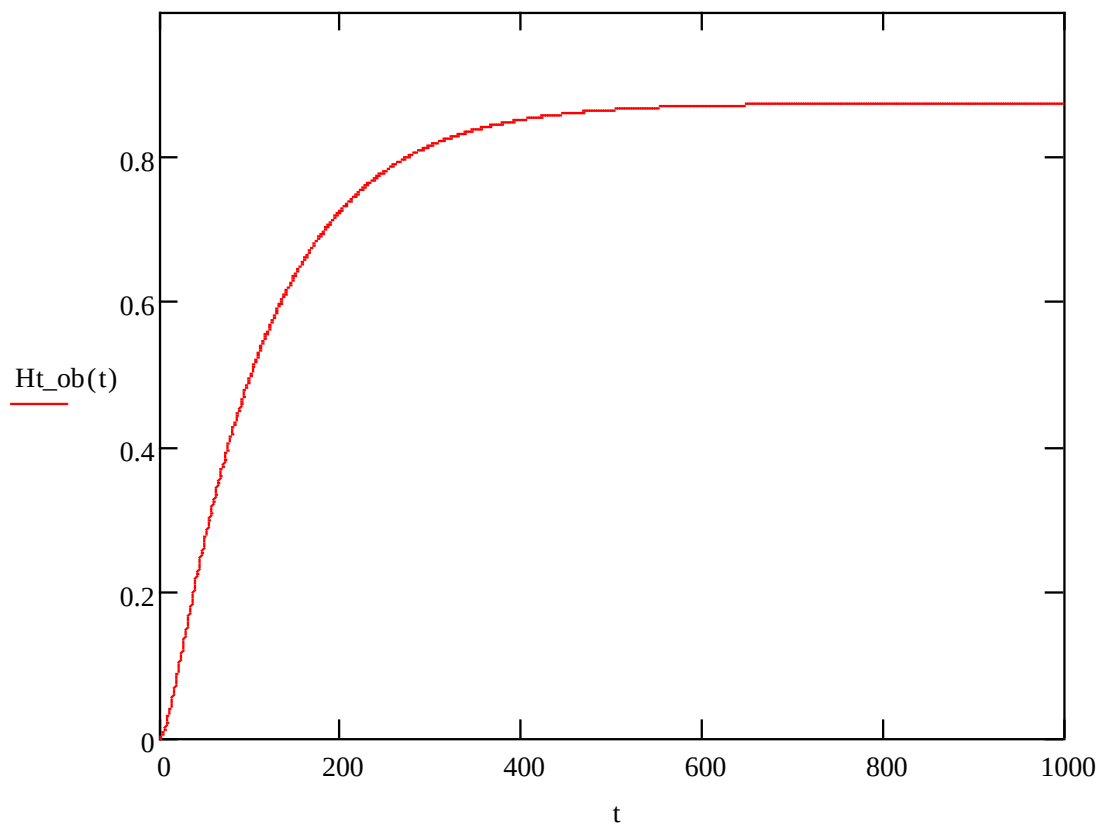


Рисунок 3.4 - Перехідна характеристика за каналом завдання-вихід

4. СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

4.1. Синтез одноконтурної замкненої системи керування

За даними технологічного регламенту температура сировини на вході в реактор, відповідно на виході з печі, відповідала 300°C , тому в дисертації стоїть задача підтримування температури на відповідному рівні. Дана задача була вирішена із реалізацією одноконтурної замкненої системи керування з ПІД-регулятором [11].

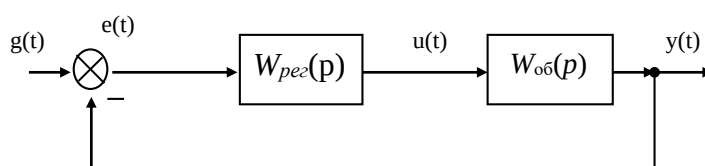


Рисунок 4.1 Структурна схема системи керування

Об'єкт представлений аперіодичною ланкою другого порядку, без запізнювання. З параметрами, що були розраховані в розділі 3.

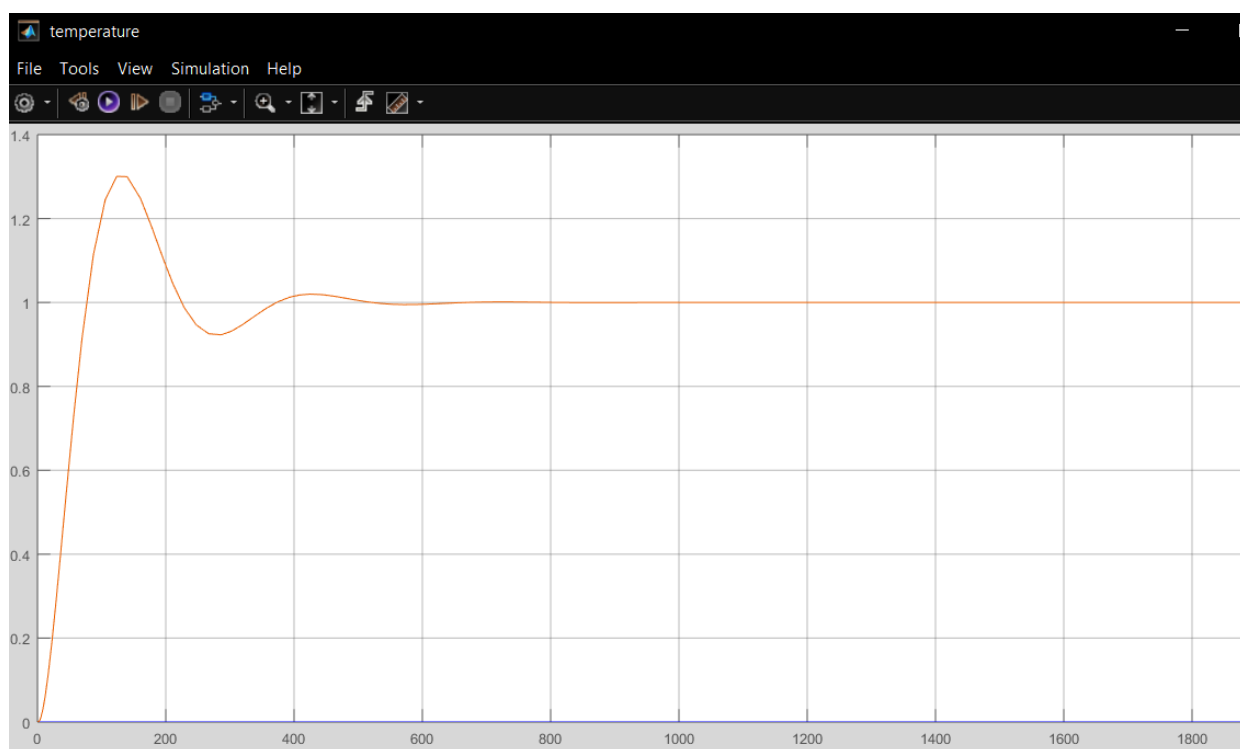


Рисунок 4.2 Перехідний процес замкненої одноконтурної системи керування з ПІД регулятором

Отриманий результат має відповідні показники якості [11]:

- Час регулювання 1000сек.
- Величина перерегулювання 18%

Остання величина розраховано за формулою

$$\sigma := \frac{y_{\max 1} - y_{\text{ust}}}{y_{\text{ust}}} \cdot 100\%$$

де $y_{\text{ust}} := 1$; $y_{\max 1} := 1.18$

Відповідно до отриманих результатів постала задача знизити величину перерегулювання та зменшення часу виходу на усталене значення. Поставлену задачу вирішимо за допомогою каскадної системи керування [11, 15].

4.2. Синтез каскадної системи керування

Структура каскаду

Типова каскадна архітектура [13, 15]:

- Зовнішній контур — регулює температуру. Генерує задачу $u_{\text{innersp}}^{\text{inner}} \cdot u_{\text{innersp}}$ для внутрішнього контуру.
- Внутрішній контур — регулює безпосередній актюатор: подачу палива / витрату $Q_{\text{in}} Q_{\text{in}}$ або подачу повітря/паливоповітряну суміш. Працює швидко, усуває локальні порушення.

Блок-діаграма каскаду:

$T_{\text{sp}} \rightarrow [\text{Outer PI/PID}] \rightarrow Q_{\text{sp_inner}} \rightarrow [\text{Inner PI}] \rightarrow \text{actuator} \rightarrow \text{Furnace } (G(s)) \rightarrow T$

Переваги каскаду:

- Зовнішній контур бачить повільний об'єкт і задає бажану швидкість роботи внутрішнього.
- Внутрішній контур швидко компенсує збурення на актюаторі (наприклад, зміни в подачі палива / тиск газу).

- Покращена стійкість і швидкість відновлення до заданої температури.
- Можливість більш агресивного налаштування зовнішнього контуру завдяки швидкій внутрішній компенсації.

Проектування внутрішнього контуру [15]

1. Ідентифікація внутрішнього об'єкта (+ пальник): зазвичай це швидкий процес першого порядку з малою τ_{in} і малим L_{in} .
2. Мета: забезпечити широку смугу пропускання (bandwidth) внутрішнього контуру: $\omega_{bw,inner} \approx 5 \div 10 \times \omega_{bw,outer}$.
3. Налаштування: PI-регулятор (або P з анти-windup). Тонке налаштування — методом «крокової» експериментальної регулювання або Ziegler–Nichols для швидких контурів.

Проектування зовнішнього контуру [15]

Для зовнішнього повільного контуру $G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-Ls}$ застосуємо ІМС (широко використовуваний і прозорий) — дає гарний компроміс швидкість / стійкість.

ІМС/ПІ-регулятор (універсальні формули для PI при FOPDT):

$$K_c = \tau K(\lambda + L), T_i = \tau, \quad K_c = \frac{\tau}{K(\lambda + L)}, \quad T_i = \tau, \quad K_c = K(\lambda + L)\tau, T_i = \tau,$$

де λ — бажаний параметр згладжування (вибирається інженером). Менше $\lambda \rightarrow$ швидший відгук, але менша стабільність. Часто λ ставлять у діапазоні $[0.2\tau, \tau]$. Рекомендації:

- агресивна робота: $\lambda = 0.2\tau$

- поміркована: $\lambda = 0.5\tau$ $\lambda = 0.5\tau$,
- консервативна / дуже стабільна: $\lambda = \tau$ $\lambda = \tau$.

Робимо ряд припущень [14, 15]:

- Ідентифіковано $K = 0.8 \text{ } ^\circ\text{C/kW}$ $K = 0.8 \text{ } ^\circ\text{C/kW}$,
- $\tau = 300 \text{ s}$ $\tau = 300 \text{ s}$,
- $L = 20 \text{ s}$ $L = 20 \text{ s}$.

Виберемо $\lambda = \tau/2 = 150 \text{ s}$ $\lambda = \tau/2 = 150 \text{ s}$.

Відповідно [13]:

$$K_c = 300 \cdot 0.8(150 + 20) = 300 \cdot 0.8 \cdot 170 = 300 \cdot 136 \approx 2.2059. K_c = \frac{300}{0.8(150 + 20)} = \frac{300}{0.8 \cdot 170} = \frac{300}{136} \approx 2.2059. K_c = 0.8(150 + 20) \cdot 300 = 0.8 \cdot 170 \cdot 300 = 136 \cdot 300 \approx 2.2059.$$

Округлено: $K_c \approx 2.21$ $K_c \approx 2.21$ (одиниці: контролерних одиниць на $^\circ\text{C}$ — залежить від скалювання).

$$T_i = \tau = 300 \text{ s. } T_i = \tau = 300 \text{ s.}$$

Додаткові елементи практичної реалізації [15]

Feedforward (передавальний) контроль

Якщо доступні змінні збурень (наприклад, температура вхідного продукту T_{in} , масова витрата продукту $m \cdot \text{dot mm}$), корисно ввести feedforward від T_{in} і $m \cdot \text{dot mm}$ у зовнішній контур. Feedforward значно покращує відгук на відомі збурення.

Анти-виндап (anti-windup)

PI/PID-регулятори повинні мати anti-windup для запобігання накопиченню інтегральної дії, коли командний сигнал обмежений фізично (наприклад, нуль-100% клапан). Застосовують бікорекцію інтегруючого каналу або back-calculation.

Обмеження безпеки та interlocks [15]

- Аварійні блокування при перевищенні $T_{\max} T_{\{\max\}} T_{\max}$ або $P_{\max} P_{\{\max\}} P_{\max}$.
- Обмеження максимальної швидкості наростання подачі палива.
- Надійні вимірювальні датчики з резервуванням (два датчики температури з вибором довіренішого, або допускається голосування).

Реалізація у PLC / SCADA [12]

- Внутрішній контур реалізувати у PLC (цикловий час контролера < 1 s для швидкого актуатора).
- Зовнішній контур можна реалізувати у тому ж PLC або у верхньому рівні SCADA, але зазвичай — теж у PLC для максимальної надійності.
- Візуалізація мнемосхеми, лог подій, архівація трендів.

Перевірка і тестування (план експерименту) [14]

1. Ідентифікація внутрішнього контуру — ступове входження, зняття відповіді.
2. Налаштування внутрішнього PI: домогтися перехідної без осциляцій (період $\leq 10 \div 20$ % від $\tau_{\text{таут}}$ зовнішнього).
3. Ідентифікація зовнішнього FOPDT через ступовий вхід у задачу внутрішнього контур (це дасть адекватну модель K, τ, LK, τ, L).
4. Розрахунок параметрів зовнішнього PI/PID (ІМС або інша методика).

5. Тест ступінчастих змін заданої температури та відомих збурень (зміна $T_{in} \rightarrow T_{in}$, зміна витрати) — оцінити перерегулювання та час відновлення.
6. Числова симуляція каскадного керування — модель печі (FOPDT) + внутрішній швидкий контур (актуатор/пальник) та зовнішній контур для температури.
7. Таблиця-протокол (шаблон) для експериментальної ідентифікації та тестування (показана як інтерактивна таблиця у вікні). Містить поля: № тесту, дата/час, опис, $\Delta Q/\Delta SP$, ΔT_{ss} , K, τ , L, примітки.
8. Початкові налаштування регуляторів використані в симуляції (можна використати як відправну точку):
 1. Зовнішній PI (IMC): $K_c = \tau K(\lambda + L)$, $K_c = \frac{\tau}{K(\lambda + L)}$, $T_i = \tau$, $T_i = \tau$. Приклад: $K_c \approx 2.21$, $T_i = 300$ ($K_c \approx 2.21$, $T_i = 300$ (для $K=0.8, \tau=300, L=20, \lambda=\tau/2$)).
 2. Внутрішній PI: прикладні стартові значення $K_c=0.8$, $T_i=30$ ($K_c=0.8$, $T_i=30$ s).
9. Практичні рекомендації: anti-windup, feedforward (по вхідній температурі/витраті), обмеження швидкості зміни подачі палива, блокування аварійних станів.

PLC / Structured Text — прикладна реалізація (псевдокод для Siemens S7 / Structured Text)

// Псевдокод Structured Text для каскадного PI

// Outer controller: temperature PI -> inner setpoint (units 0..100)

// Inner controller: PI controlling actuator (units 0..100) -> valve/actuator

// Змінні

```

REAL T_meas;    // виміряна температура, °C
REAL T_sp;      // температурна установка, °C
REAL Qin_meas;  // поточна подача палива (kW or units)
REAL outer_sp;  // вихід зовнішнього PI (units 0..100)
REAL inner_u;   // вихід внутрішнього PI (units 0..100)
// Параметри зовнішнього PI
REAL Kc_out := 2.21; // приклад
REAL Ti_out := 300.0;
REAL integr_out := 0.0;
REAL dt := 1.0;    // цикловий час PLC в сек.
// Параметри внутрішнього PI
REAL Kc_in := 0.8;
REAL Ti_in := 30.0;
REAL integr_in := 0.0;
// Анти-віндап функція
FUNCTION_BLOCK AntiWindup_PI
VAR_INPUT
    e : REAL;
    Kc : REAL;
    Ti : REAL;
    limit_min : REAL;
    limit_max : REAL;
    dt : REAL;
END_VAR
VAR_OUTPUT
    u_out : REAL;
    integ : REAL;
END_VAR

```

// Простий PI з back-calculation не показаний повністю — використовувати вбудовані FB в TIA Portal.

// Основний цикл (викликається раз на dt)

e_out := T_sp - T_meas;

integr_out := integr_out + e_out * dt;

outer_sp := Kc_out * (e_out + (1.0/Ti_out) * integr_out);

// обмеження зовнішнього виводу

IF outer_sp > 100.0 THEN

outer_sp := 100.0;

integr_out := integr_out - e_out * dt; // простий анти-віндап

END_IF

IF outer_sp < 0.0 THEN

outer_sp := 0.0;

integr_out := integr_out - e_out * dt;

END_IF

// Inner controller

e_in := outer_sp - Qin_meas; // приймаємо Qin_meas у тих же одиницях

integr_in := integr_in + e_in * dt;

inner_u := Kc_in * (e_in + (1.0/Ti_in) * integr_in);

IF inner_u > 100.0 THEN

inner_u := 100.0;

integr_in := integr_in - e_in * dt;

END_IF

IF inner_u < 0.0 THEN

inner_u := 0.0;

integr_in := integr_in - e_in * dt;

END_IF

// Після цього inner_u надсилається на вихід (аналог 0..10V або 4..20mA через модуль)

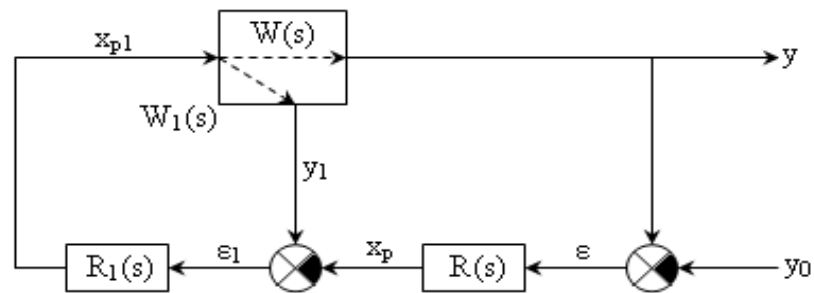


Рисунок 4.3. Структурна схема каскадної системи регулювання.

Еквівалентні перетворення системи керування

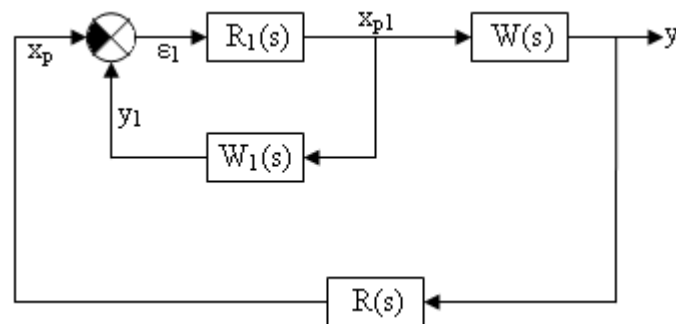


Рисунок 4.4. Структурна схема еквівалентної одноконтурної системи з основним регулятором $R(s)$.

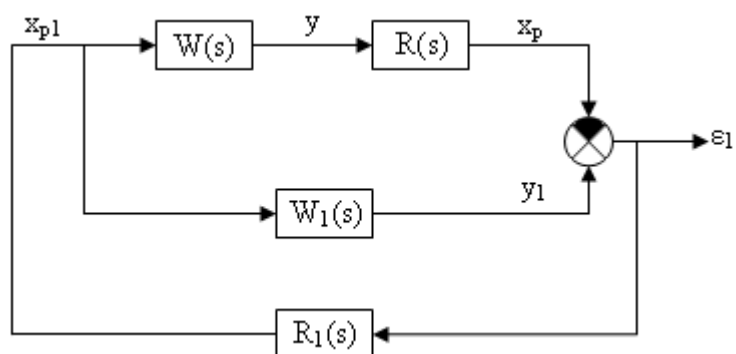


Рисунок 4.5. Структурна схема еквівалентної одноконтурної системи з допоміжним регулятором $R_1(s)$.

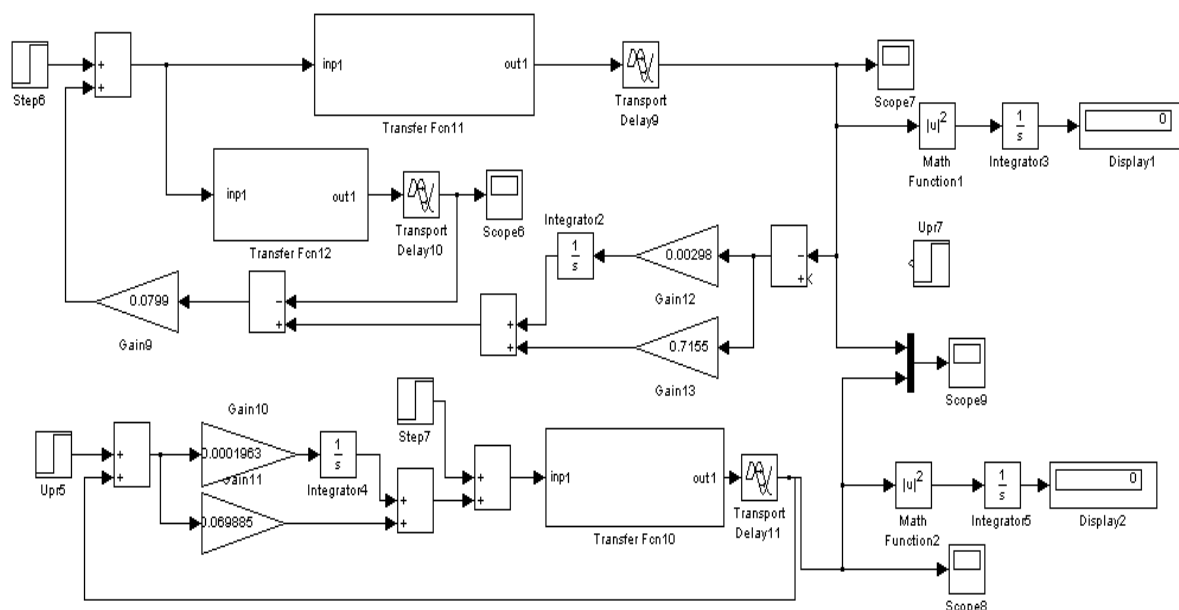


Рисунок 4.6. Порівняльний аналіз одноконтурної та каскадної системи керування.

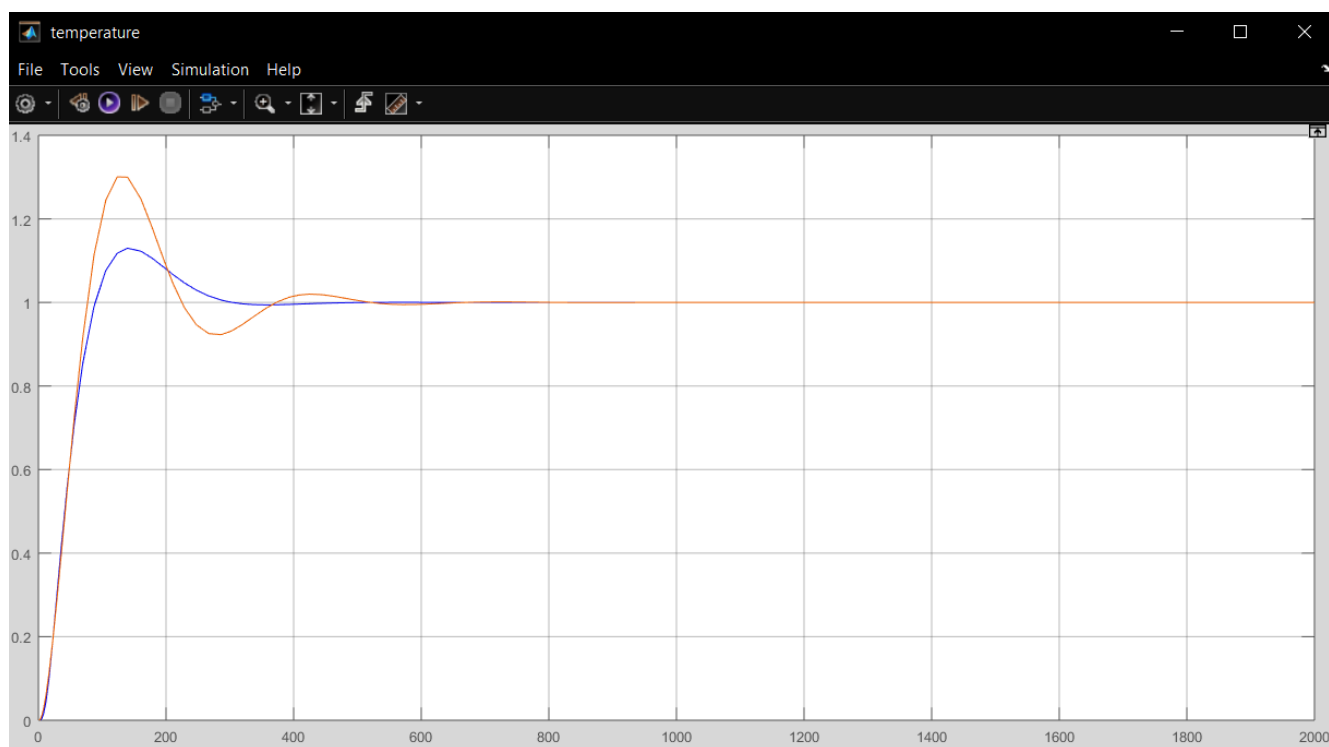


Рисунок 4.7. Порівняльний аналіз перехідних процесів одноконтурної та каскадної системи керування

Порівняльний аналіз дає розуміння, що використання каскадної системи керування в двічі зменшить перерегулювання та пришвидшить вихід на усталене значення до 450сек.

5. ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

5.1 Способи розрахунку ймовірностей безвідмовної роботи

Розглянемо розроблену систему керування витратою на вході до печі. Постала задача у необхідності резервування та відповідно кількості резервування; вибір системи, що буде використано в обслуговуванні обладнання; необхідність отримати інформацію про можливі ремонти системи, та визначити час між капітальними ремонтами системи контролю та керування [16].

В системі керування, згідно зв'язку між елементами: при відмові одного відмовляють ті що йдуть далі по ланцюгу, структурно-логічна схема даної системи буде відповідно лінійною [16]

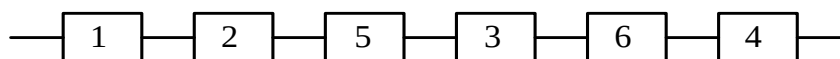


Рисунок 5.1 – Структурно-логічна схема об'єкту керування

Мають місце два основні параметри: інтенсивності відмов (λ , що визначається у 1/год); відновлення (μ , що визначається 1/год)

Таблиця 5.1 Інтенсивність відмов та відновлення.

λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7	λ_8
$4 \cdot 10^{(-4)}$	$4 \cdot 10^{(-4)}$	$4 \cdot 10^{(-4)}$	$4 \cdot 10^{(-4)}$	$2 \cdot 10^{(-4)}$	$2 \cdot 10^{(-4)}$	$4 \cdot 10^{(-4)}$	$4 \cdot 10^{(-4)}$
μ_1	μ_2	μ_3	μ_4	μ_5	μ_6	μ_7	μ_8
0,175	0,5	-	-	-	-	0,175	0,5

Існує декілька способів розрахунку ймовірностей безвідмовної роботи

Вибереємо варіант, що реалізує формулу

$$P_{s4}(t, k) := \left[1 - (1 - P_1(t))^{k+1} \right] \cdot \left[1 - (1 - P_2(t))^{k+1} \right] \cdot P_5(t) \cdot P_4(t) \cdot P_3(t) \cdot P_6(t)$$

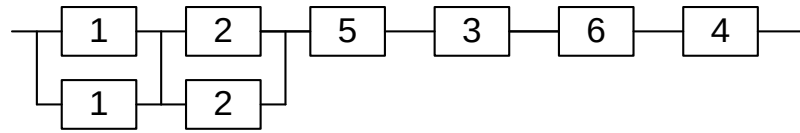


Рисунок 5.2 – Структурно-логічна схема ймовірності безвідмовної роботи зарезервованої не відновлюваної системи

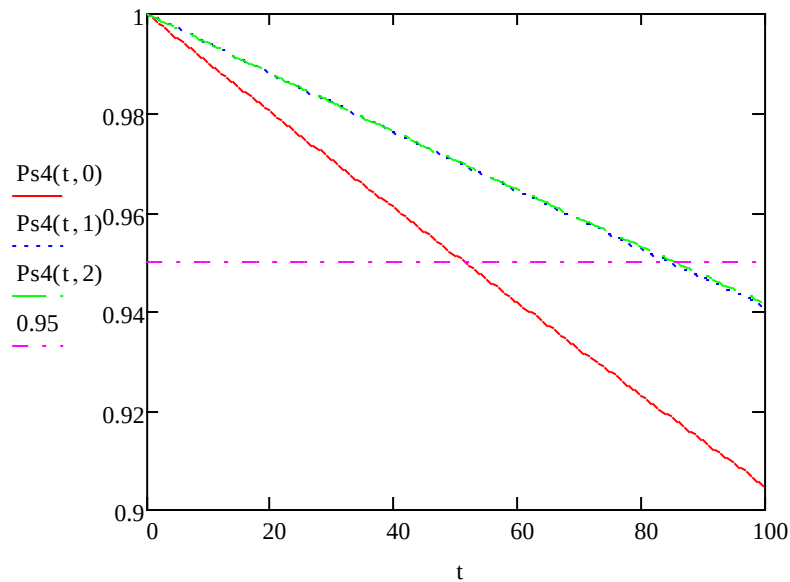


Рисунок 5.3 – Ймовірність безвідмовної роботи не відновлюваної системи з різною кратністю резервування

Враховуючи, що система керування з резервуванням трьох елементів буде значною мірою об'ємною, поставлене завдання в дисертації буде зведено до двох елементів [16].

Представлено матриці переходів та станів для режиму обслуговування однією ремонтною бригадою, що використовує прямий пріоритет.

Таблиця 5.2 – Матриця переходів

0	1	2	7	8	12	18	21
x1	0	21	71	81	2	8	
x2	12	0	72	82		182	1
x3	13	23	73	83	123	183	213
x4	14	24	74	84	124	184	214
x5	15	25	75	85	125	185	215
x6	16	26	76	86	126	186	216

x7	17	27	0	87	127	187	217
x8	18	28	78	0	128		218
0	27	72	78	81	87		
x1	271	721	781		871		
x2	7		782	812	872		
x3	273	723	783	813	873		
x4	274	724	784	814	874		
x5	275	725	785	815	875		
x6	276	726	786	816	876		
x7		2	8	817			
x8	278	728		1	7		

Таблиця 5.3 – Матриця станів

0	1	2	3	4	5	6	7	8	12	13	14	15	16	17	18	21	23	24
x1	τ_1	S_1	$S_1,$	$S_1,$	$S_1,$	$S_1,$	S_1	S_1	τ_1	τ_1	τ_1	τ_1	τ_1	τ_1	τ_1	0 W_1	$S_1,$	$S_1,$
x2	S_2	τ_2	$S_2,$	$S_2,$	$S_2,$	$S_2,$	S_2	S_2	0 W_2	$S_2,$	$S_2,$	$S_2,$	$S_2,$	$S_2,$	S_2	τ_2	τ_2	τ_2
x3	S_3	S_3	τ_3	$S_3,$	$S_3,$	$S_3,$	S_3	S_3	S_3	0 W_3	$S_3,$	$S_3,$	$S_3,$	$S_3,$	S_3	S_3	0 W_3	$S_3,$
x4	S_4	S_4	$S_4,$	τ_4	$S_4,$	$S_4,$	S_4	S_4	S_4	$S_4,$	0 W_4	$S_4,$	$S_4,$	$S_4,$	S_4	S_4	$S_4,$	0 W_4
x5	S_5	S_5	$S_5,$	$S_5,$	τ_5	$S_5,$	S_5	S_5	S_5	$S_5,$	$S_5,$	0 W_5	$S_5,$	$S_5,$	S_5	S_5	$S_5,$	$S_5,$
x6	S_6	S_6	$S_6,$	$S_6,$	$S_6,$	τ_6	S_6	S_6	S_6	$S_6,$	$S_6,$	$S_6,$	0 W_6	$S_6,$	S_6	S_6	$S_6,$	$S_6,$
x7	S_7	S_7	$S_7,$	$S_7,$	$S_7,$	$S_7,$	τ_7	S_7	S_7	$S_7,$	$S_7,$	$S_7,$	$S_7,$	0 W_7	S_7	S_7	$S_7,$	$S_7,$
x8	S_8	S_8	$S_8,$	$S_8,$	$S_8,$	$S_8,$	S_8	τ_8	S_8	$S_8,$	$S_8,$	$S_8,$	$S_8,$	$S_8,$	0 W_8	S_8	$S_8,$	$S_8,$
Стан	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0

0	25	26	27	28	71	72	73	74	75	76	78	81	82	83	84	85	86	87	
x1	S ₁ ,	S ₁ ,	S ₁	S ₁ ,	0 W ₁	S ₁	S ₁ ,	S ₁ ,	S ₁ ,	S ₁ ,	S ₁	0 W ₁	S ₁ ,	S ₁ ,	S ₁ ,	S ₁ ,	S ₁ ,	S ₁	
x2	τ2	τ2	τ2	τ2	S ₂ ,	0 W ₂	S ₂ ,	S ₂ ,	S ₂ ,	S ₂ ,	S ₂	S ₂	0 W ₂	S ₂ ,	S ₂ ,	S ₂ ,	S ₂ ,	S ₂	
x3	S ₃ ,	S ₃ ,	S ₃	S ₃ ,	S ₃ ,	S ₃	0 W ₃	S ₃ ,	S ₃ ,	S ₃ ,	S ₃	S ₃	S ₃ ,	0 W ₃	S ₃ ,	S ₃ ,	S ₃ ,	S ₃	
x4	S ₄ ,	S ₄ ,	S ₄	S ₄ ,	S ₄ ,	S ₄	S ₄ ,	0 W ₄	S ₄ ,	S ₄ ,	S ₄	S ₄	S ₄ ,	S ₄ ,	0 W ₄	S ₄ ,	S ₄ ,	S ₄	
x5	0 W ₅	S ₅ ,	S ₅	S ₅ ,	S ₅ ,	S ₅	S ₅ ,	S ₅ ,	0 W ₅	S ₅ ,	S ₅	S ₅	S ₅ ,	S ₅ ,	S ₅ ,	S ₅ ,	0 W ₅	S ₅ ,	S ₅
x6	S ₆ ,	0 W ₆	S ₆	S ₆ ,	S ₆ ,	S ₆	S ₆ ,	S ₆ ,	S ₆ ,	0 W ₆	S ₆	S ₆	S ₆ ,	S ₆ ,	S ₆ ,	S ₆ ,	S ₆ ,	0 W ₆	S ₆
x7	S ₇ ,	S ₇ ,	0 W ₇	S ₇ ,	τ7	τ7	τ7	τ7	τ7	τ7	τ7	S ₇	S ₇ ,	S ₇ ,	S ₇ ,	S ₇ ,	S ₇ ,	S ₇ ,	0 W ₇
x8	S ₈ ,	S ₈ ,	S ₈	0 W ₈	S ₈ ,	S ₈	S ₈ ,	S ₈ ,	S ₈ ,	S ₈ ,	0 W ₈	τ8	τ8	τ8	τ8	τ8	τ8	τ8	τ8
С _Т а _Н	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	
0	12 3	12 4	12 5	12 6	12 7	12 8	18 2	18 3	18 4	18 5	18 6	18 7	21 3	21 4	21 5	21 6	21 7	21 8	
x1	τ1	τ1	τ1	τ1	τ1	τ1	τ1	τ1	τ1	τ1	τ1	τ1	0 W _{1¹}	0 W _{1¹}	0 W _{1¹}	0 W _{1¹}	0 W _{1¹}	0 W _{1¹}	
x2	0 W _{2¹}	0 W _{2¹}	0 W _{2¹}	0 W _{2¹}	0 W _{2¹}	0 W _{2¹}	0 W _{2²}	S ₂ ,	S ₂ ,	S ₂ ,	S ₂ ,	S ₂ ,	τ2	τ2	τ2	τ2	τ2	τ2	
x3	0 W _{3²}	S ₃ ,	S ₃ ,	S ₃ ,	S ₃ ,	S ₃ ,	S ₃ ,	0 W _{3²}	S ₃ ,	S ₃ ,	S ₃ ,	S ₃ ,	0 W _{3²}	S ₃ ,	S ₃ ,	S ₃ ,	S ₃ ,	S ₃ ,	
x4	S ₄ ,	0 W _{4²}	S ₄ ,	S ₄ ,	S ₄ ,	S ₄ ,	S ₄ ,	S ₄ ,	0 W _{4²}	S ₄ ,	S ₄ ,	S ₄ ,	S ₄ ,	0 W _{4²}	S ₄ ,	S ₄ ,	S ₄ ,	S ₄ ,	

С та н	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	81 2	81 3	81 4	81 5	81 6	81 7	87 1	87 2	87 3	87 4	87 5	87 6						
x1	0 W 1 ¹	0 W 1 ¹	0 W 1 ¹	0 W 1 ¹	0 W 1 ¹	0 W 1 ¹	0 W 1 ²	S ₁ ,	S ₁ ,	S ₁ ,	S ₁ ,	S ₁ ,						
x2	0 W 2 ²	S ₂ ,	S ₂ ,	S ₂ ,	S ₂ ,	S ₂ ,	S ₂ ,	0 W 2 ²	S ₂ ,	S ₂ ,	S ₂ ,	S ₂ ,						
x3	S ₃ ,	0 W 3 ²	S ₃ ,	S ₃ ,	S ₃ ,	S ₃ ,	S ₃ ,	S ₃ ,	0 W 3 ²	S ₃ ,	S ₃ ,	S ₃ ,						
x4	S ₄ ,	S ₄ ,	0 W 4 ²	S ₄ ,	S ₄ ,	S ₄ ,	S ₄ ,	S ₄ ,	S ₄ ,	0 W 4 ²	S ₄ ,	S ₄ ,						
x5	S ₅ ,	S ₅ ,	S ₅ ,	0 W 5 ²	S ₅ ,	S ₅ ,	S ₅ ,	S ₅ ,	S ₅ ,	S ₅ ,	0 W 5 ²	S ₅ ,						
x6	S ₆ ,	S ₆ ,	S ₆ ,	S ₆ ,	0 W 6 ²	S ₆ ,	S ₆ ,	S ₆ ,	S ₆ ,	S ₆ ,	S ₆ ,	0 W 6 ²						
x7	S ₇ ,	S ₇ ,	S ₇ ,	S ₇ ,	S ₇ ,	0 W 7 ²	0 W 7 ¹	0 W 7 ¹	0 W 7 ¹	0 W 7 ¹	0 W 7 ¹	0 W 7 ¹						
x8	τ8	τ8	τ8	τ8	τ8	τ8	τ8	τ8	τ8	τ8	τ8	τ8						
С та н	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0						

Графи станів системи керування для режимів обслуговування відповідно будуть [16]: прямий, зворотний, з першим пріоритетним елементом

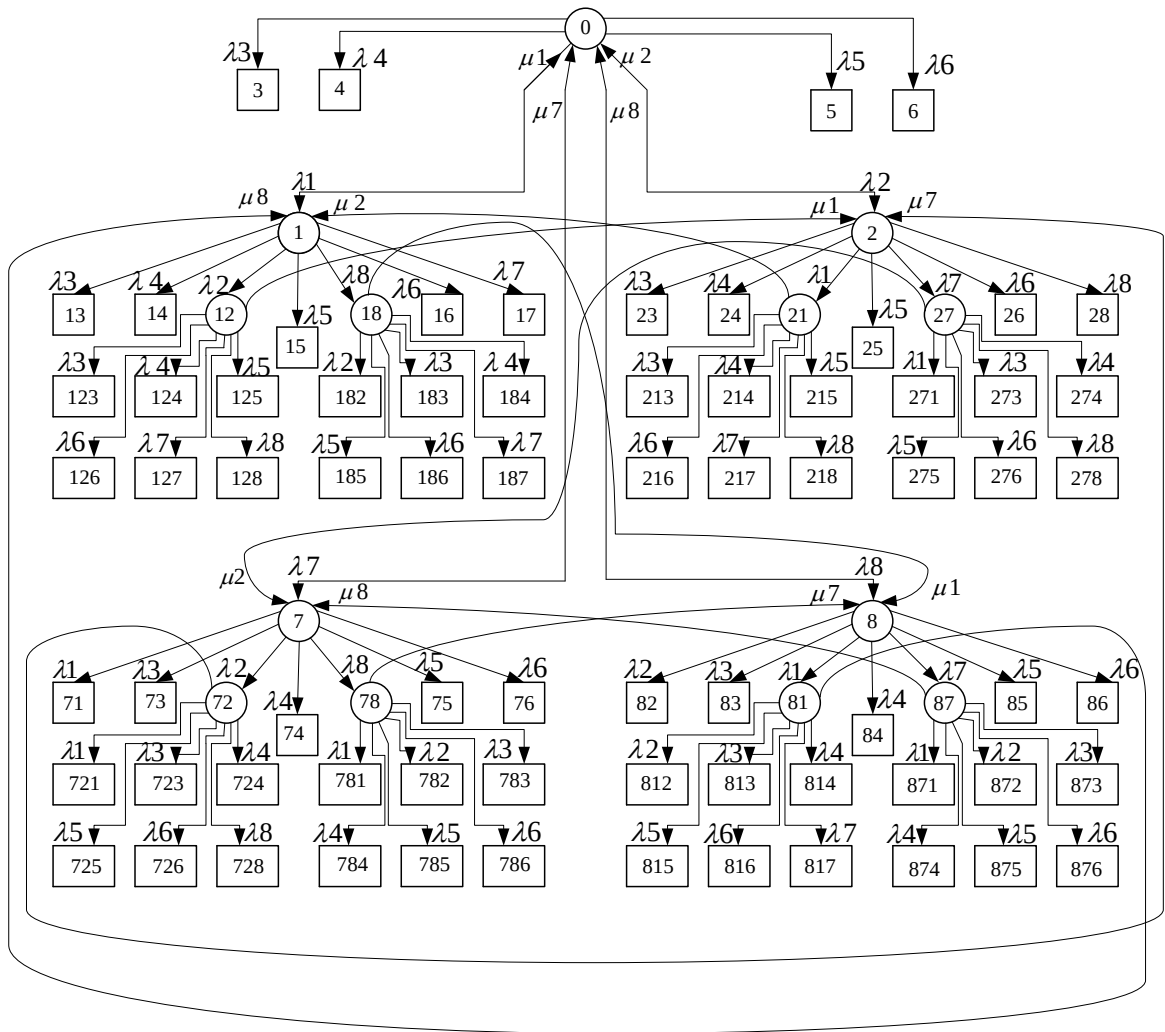


Рисунок 5.4. Граф станів для системи керування з прямим пріоритетом елементом

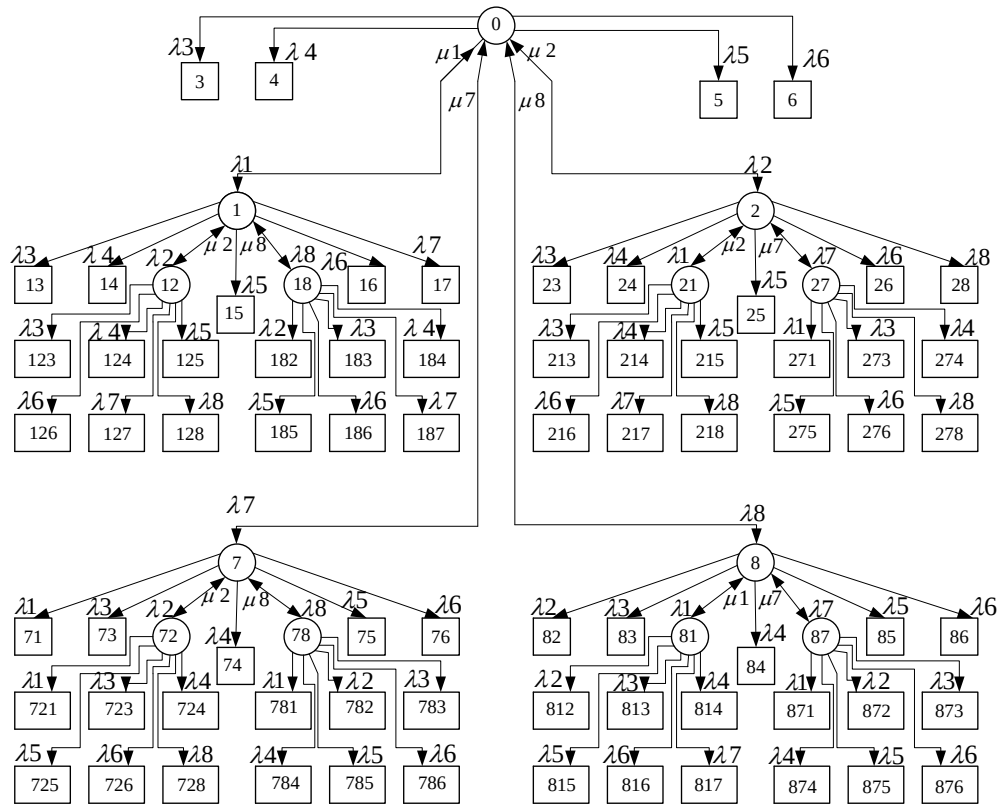


Рисунок 5.5. Граф станів для системи керування зі зворотнім пріоритетом

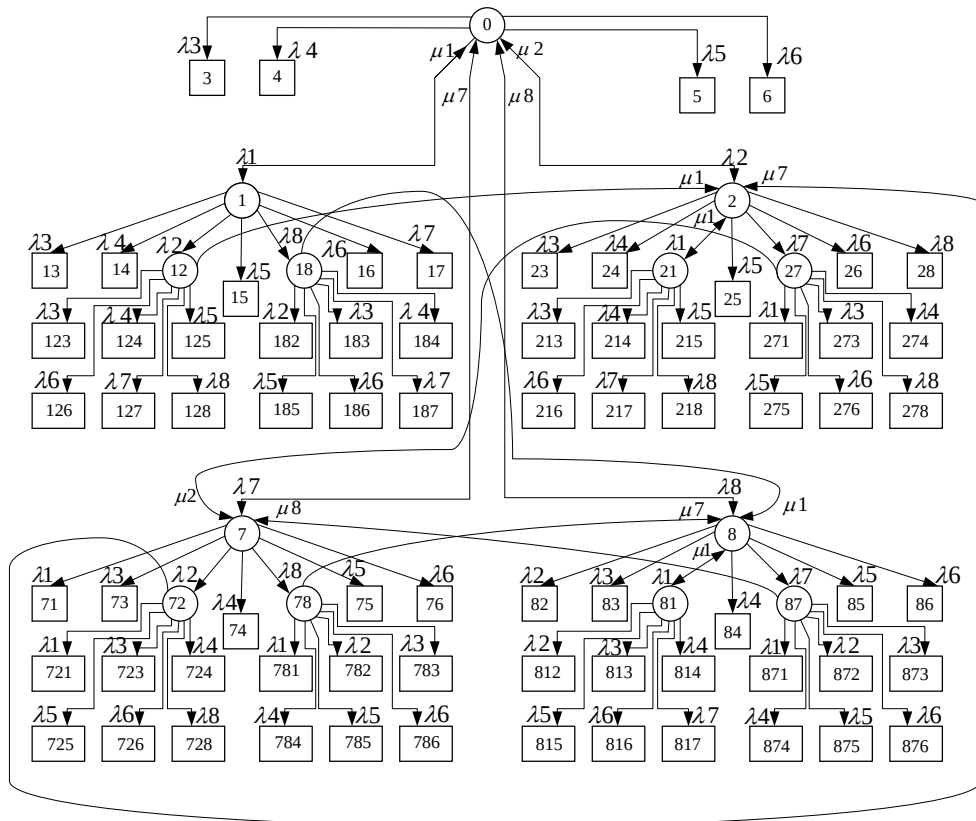


Рисунок 5.6. Граф станів для системи керування з першим пріоритетним елементом

Перший елемент є пріоритетним виходячи із того, що цей елемент міститься безпосередньо на лінії виробництва, відповідно перебуває в поганих умовах по відношенню до інших елементів [16]. Виходячи з того, що він є датчиком, значить можливість отримання інформаційного потоку даних повинна бути безперервною, а можливості ремонтних робіт повинні відбуватися без демонтажу поточної лінії виробництва.

Розроблено принцип перепозначень.

Таблиця 5.4 – Таблиця перепозначень

Позначення	Значення коду стану	Позначення	Значення коду стану
0	0	43	182
1	1	44	183
2	2	45	184
3	3	46	185
4	4	47	186
5	5	48	187
6	6	49	213
7	7	50	214
8	8	51	215
9	12	52	216
10	18	53	217
11	21	54	218
12	27	55	271
13	72	56	273
14	78	57	274
15	81	58	275
16	87	59	276
17	13	60	278
18	14	61	721
19	15	62	723
20	16	63	724
21	17	64	725
22	23	65	726
23	24	66	728
24	25	67	781
25	26	68	782
26	28	69	783
27	71	70	784

28	73	71	785
29	74	72	786
30	75	73	812
31	76	74	813
32	82	75	814
33	83	76	815
34	84	77	816
35	85	78	817
36	86	79	871
37	123	80	872
38	124	81	873
39	125	82	874
40	126	83	875
41	127	84	876
42	128		

Таким чином система зі зворотнім пріоритетом буде відповідно виглядати наступним чином:

$$\frac{d}{dt}x_0 = \mu_1 \cdot x_1 + \mu_2 \cdot x_2 + \mu_7 \cdot x_7 + \mu_8 \cdot x_8 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_7 + \lambda_8) \cdot x_0$$

$$\frac{d}{dt}x_1 = \lambda_1 \cdot x_0 - \mu_1 \cdot x_1 - (\lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_7 + \lambda_8) \cdot x_1 + \mu_2 \cdot x_9 + \mu_8 \cdot x_{10}$$

$$\frac{d}{dt}x_2 = \lambda_2 \cdot x_0 - \mu_2 \cdot x_2 - (\lambda_1 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_7 + \lambda_8) \cdot x_2 + \mu_1 \cdot x_{11} + \mu_7 \cdot x_{12}$$

$$\frac{d}{dt}x_3 = \lambda_3 \cdot x_0$$

$$\frac{d}{dt}x_4 = \lambda_4 \cdot x_0$$

$$\frac{d}{dt}x_5 = \lambda_5 \cdot x_0$$

$$\frac{d}{dt}x_6 = \lambda_6 \cdot x_0$$

$$\frac{d}{dt}x_7 = \lambda_7 \cdot x_0 - \mu_7 \cdot x_7 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_8) \cdot x_7 + \mu_2 \cdot x_{13} + \mu_8 \cdot x_{14}$$

$$\frac{d}{dt}x_8 = \lambda_8 \cdot x_0 - \mu_8 \cdot x_8 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_7) \cdot x_8 + \mu_1 \cdot x_{15} + \mu_7 \cdot x_{16}$$

$$\frac{d}{dt}x_9 = \lambda_2 \cdot x_1 - (\lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_7 + \lambda_8) \cdot x_9 - \mu_2 \cdot x_9$$

$$\frac{d}{dt}x_{10} = \lambda_8 \cdot x_1 - (\lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_7) \cdot x_{10} - \mu_8 \cdot x_{10}$$

$$\frac{d}{dt}x_{11} = \lambda_1 \cdot x_2 - (\lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_7 + \lambda_8) \cdot x_{11} - \mu_1 \cdot x_{11}$$

$$\frac{d}{dt}x_{12} = \lambda_7 \cdot x_2 - (\lambda_1 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_8) \cdot x_{12} - \mu_7 \cdot x_{12}$$

$$\frac{d}{dt}x_{13} = \lambda_2 \cdot x_7 - (\lambda_1 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_8) \cdot x_{13} - \mu_2 \cdot x_{13}$$

$$\frac{d}{dt}x_{14} = \lambda_8 \cdot x_7 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6) \cdot x_{14} - \mu_8 \cdot x_{14}$$

$$\frac{d}{dt}x_{15} = \lambda_1 \cdot x_8 - (\lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_7) \cdot x_{15} - \mu_1 \cdot x_{15}$$

$$\frac{d}{dt}x_{16} = \lambda_7 \cdot x_8 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6) \cdot x_{16} - \mu_7 \cdot x_{16}$$

...

$$\frac{d}{dt}x_{17} = \lambda_3 \cdot x_1$$

$$\frac{d}{dt}x_{34} = \lambda_4 \cdot x_8$$

$$\frac{d}{dt}x_{51} = \lambda_5 \cdot x_{11}$$

$$\frac{d}{dt}x_{68} = \lambda_2 \cdot x_{14}$$

$$\frac{d}{dt}x_{18} = \lambda_4 \cdot x_1$$

$$\frac{d}{dt}x_{35} = \lambda_5 \cdot x_8$$

$$\frac{d}{dt}x_{52} = \lambda_6 \cdot x_{11}$$

$$\frac{d}{dt}x_{69} = \lambda_3 \cdot x_{14}$$

$$\frac{d}{dt}x_{19} = \lambda_5 \cdot x_1$$

$$\frac{d}{dt}x_{36} = \lambda_6 \cdot x_8$$

$$\frac{d}{dt}x_{53} = \lambda_7 \cdot x_{11}$$

$$\frac{d}{dt}x_{70} = \lambda_4 \cdot x_{14}$$

$$\frac{d}{dt}x_{20} = \lambda_6 \cdot x_1$$

$$\frac{d}{dt}x_{37} = \lambda_3 \cdot x_9$$

$$\frac{d}{dt}x_{54} = \lambda_8 \cdot x_{11}$$

$$\frac{d}{dt}x_{71} = \lambda_5 \cdot x_{14}$$

...

...

$$\frac{d}{dt}x_{21} = \lambda_7 \cdot x_1$$

$$\frac{d}{dt}x_{22} = \lambda_3 \cdot x_2$$

$$\frac{d}{dt}x_{23} = \lambda_4 \cdot x_2$$

$$\frac{d}{dt}x_{24} = \lambda_5 \cdot x_2$$

$$\frac{d}{dt}x_{25} = \lambda_6 \cdot x_2$$

$$\frac{d}{dt}x_{26} = \lambda_8 \cdot x_2$$

$$\frac{d}{dt}x_{27} = \lambda_1 \cdot x_7$$

$$\frac{d}{dt}x_{28} = \lambda_3 \cdot x_7$$

$$\frac{d}{dt}x_{29} = \lambda_4 \cdot x_7$$

$$\frac{d}{dt}x_{30} = \lambda_5 \cdot x_7$$

$$\frac{d}{dt}x_{31} = \lambda_6 \cdot x_7$$

$$\frac{d}{dt}x_{32} = \lambda_2 \cdot x_8$$

$$\frac{d}{dt}x_{33} = \lambda_3 \cdot x_8$$

$$\frac{d}{dt}x_{38} = \lambda_4 \cdot x_9$$

$$\frac{d}{dt}x_{39} = \lambda_5 \cdot x_9$$

$$\frac{d}{dt}x_{40} = \lambda_6 \cdot x_9$$

$$\frac{d}{dt}x_{41} = \lambda_7 \cdot x_9$$

$$\frac{d}{dt}x_{42} = \lambda_8 \cdot x_9$$

$$\frac{d}{dt}x_{43} = \lambda_2 \cdot x_{10}$$

$$\frac{d}{dt}x_{44} = \lambda_3 \cdot x_{10}$$

$$\frac{d}{dt}x_{45} = \lambda_4 \cdot x_{10}$$

$$\frac{d}{dt}x_{46} = \lambda_5 \cdot x_{10}$$

$$\frac{d}{dt}x_{47} = \lambda_6 \cdot x_{10}$$

$$\frac{d}{dt}x_{48} = \lambda_7 \cdot x_{10}$$

$$\frac{d}{dt}x_{49} = \lambda_3 \cdot x_{11}$$

$$\frac{d}{dt}x_{50} = \lambda_4 \cdot x_{11}$$

$$\frac{d}{dt}x_{55} = \lambda_1 \cdot x_{12}$$

$$\frac{d}{dt}x_{56} = \lambda_3 \cdot x_{12}$$

$$\frac{d}{dt}x_{57} = \lambda_4 \cdot x_{12}$$

$$\frac{d}{dt}x_{58} = \lambda_5 \cdot x_{12}$$

$$\frac{d}{dt}x_{59} = \lambda_6 \cdot x_{12}$$

$$\frac{d}{dt}x_{60} = \lambda_8 \cdot x_{12}$$

$$\frac{d}{dt}x_{61} = \lambda_1 \cdot x_{13}$$

$$\frac{d}{dt}x_{62} = \lambda_3 \cdot x_{13}$$

$$\frac{d}{dt}x_{63} = \lambda_4 \cdot x_{13}$$

$$\frac{d}{dt}x_{64} = \lambda_5 \cdot x_{13}$$

$$\frac{d}{dt}x_{65} = \lambda_6 \cdot x_{13}$$

$$\frac{d}{dt}x_{66} = \lambda_8 \cdot x_{13}$$

$$\frac{d}{dt}x_{67} = \lambda_1 \cdot x_{14}$$

$$\frac{d}{dt}x_{72} = \lambda_6 \cdot x_{14}$$

$$\frac{d}{dt}x_{73} = \lambda_2 \cdot x_{15}$$

$$\frac{d}{dt}x_{74} = \lambda_3 \cdot x_{15}$$

$$\frac{d}{dt}x_{75} = \lambda_4 \cdot x_{15}$$

$$\frac{d}{dt}x_{76} = \lambda_5 \cdot x_{15}$$

$$\frac{d}{dt}x_{77} = \lambda_6 \cdot x_{15}$$

$$\frac{d}{dt}x_{78} = \lambda_7 \cdot x_{15}$$

$$\frac{d}{dt}x_{79} = \lambda_1 \cdot x_{16}$$

$$\frac{d}{dt}x_{80} = \lambda_2 \cdot x_{16}$$

$$\frac{d}{dt}x_{81} = \lambda_3 \cdot x_{16}$$

$$\frac{d}{dt}x_{82} = \lambda_4 \cdot x_{16}$$

$$\frac{d}{dt}x_{83} = \lambda_5 \cdot x_{16}$$

$$\frac{d}{dt}x_{84} = \lambda_6 \cdot x_{16}$$

У свою чергу для системи керування з прямим пріоритетом:

$$\frac{d}{dt}x_0 = \mu_1 \cdot x_1 + \mu_2 \cdot x_2 + \mu_7 \cdot x_7 + \mu_8 \cdot x_8 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_7 + \lambda_8) \cdot x_0$$

$$\frac{d}{dt}x_1 = \lambda_1 \cdot x_0 - \mu_1 \cdot x_1 - (\lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_7 + \lambda_8) \cdot x_1 + \mu_2 \cdot x_{11} + \mu_8 \cdot x_{15}$$

$$\frac{d}{dt}x_2 = \lambda_2 \cdot x_0 - \mu_2 \cdot x_2 - (\lambda_1 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_7 + \lambda_8) \cdot x_2 + \mu_1 \cdot x_9 + \mu_7 \cdot x_{13}$$

$$\frac{d}{dt}x_3 = \lambda_3 \cdot x_0$$

$$\frac{d}{dt}x_4 = \lambda_4 \cdot x_0$$

$$\frac{d}{dt}x_5 = \lambda_5 \cdot x_0$$

$$\frac{d}{dt}x_6 = \lambda_6 \cdot x_0$$

$$\frac{d}{dt}x_7 = \lambda_7 \cdot x_0 - \mu_7 \cdot x_7 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_8) \cdot x_7 + \mu_2 \cdot x_{12} + \mu_8 \cdot x_{16}$$

$$\frac{d}{dt}x_8 = \lambda_8 \cdot x_0 - \mu_8 \cdot x_8 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_7) \cdot x_8 + \mu_7 \cdot x_{14} + \mu_1 \cdot x_{10}$$

...

$$\frac{d}{dt}x_9 = \lambda_2 \cdot x_1 - (\lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_7 + \lambda_8) \cdot x_9 - \mu_1 \cdot x_9$$

$$\frac{d}{dt}x_{10} = \lambda_8 \cdot x_1 - (\lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_7) \cdot x_{10} - \mu_1 \cdot x_{10}$$

$$\frac{d}{dt}x_{11} = \lambda_1 \cdot x_2 - (\lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_7 + \lambda_8) \cdot x_{11} - \mu_2 \cdot x_{11}$$

$$\frac{d}{dt}x_{12} = \lambda_7 \cdot x_2 - (\lambda_1 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_8) \cdot x_{12} - \mu_2 \cdot x_{12}$$

$$\frac{d}{dt}x_{13} = \lambda_2 \cdot x_7 - (\lambda_1 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_8) \cdot x_{13} - \mu_7 \cdot x_{13}$$

$$\frac{d}{dt}x_{14} = \lambda_8 \cdot x_7 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6) \cdot x_{14} - \mu_7 \cdot x_{14}$$

$$\frac{d}{dt}x_{15} = \lambda_1 \cdot x_8 - (\lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_7) \cdot x_{15} - \mu_8 \cdot x_{15}$$

$$\frac{d}{dt}x_{16} = \lambda_7 \cdot x_8 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6) \cdot x_{16} - \mu_8 \cdot x_{16}$$

$$\frac{d}{dt}x_{17} = \lambda_3 \cdot x_1$$

$$\frac{d}{dt}x_{34} = \lambda_4 \cdot x_8$$

$$\frac{d}{dt}x_{51} = \lambda_5 \cdot x_{11}$$

$$\frac{d}{dt}x_{68} = \lambda_2 \cdot x_{14}$$

$$\frac{d}{dt}x_{18} = \lambda_4 \cdot x_1$$

$$\frac{d}{dt}x_{35} = \lambda_5 \cdot x_8$$

$$\frac{d}{dt}x_{52} = \lambda_6 \cdot x_{11}$$

$$\frac{d}{dt}x_{69} = \lambda_3 \cdot x_{14}$$

$$\frac{d}{dt}x_{19} = \lambda_5 \cdot x_1$$

$$\frac{d}{dt}x_{36} = \lambda_6 \cdot x_8$$

$$\frac{d}{dt}x_{53} = \lambda_7 \cdot x_{11}$$

$$\frac{d}{dt}x_{70} = \lambda_4 \cdot x_{14}$$

$$\frac{d}{dt}x_{20} = \lambda_6 \cdot x_1$$

$$\frac{d}{dt}x_{37} = \lambda_3 \cdot x_9$$

$$\frac{d}{dt}x_{54} = \lambda_8 \cdot x_{11}$$

$$\frac{d}{dt}x_{71} = \lambda_5 \cdot x_{14}$$

$$\frac{d}{dt}x_{21} = \lambda_7 \cdot x_1$$

$$\frac{d}{dt}x_{38} = \lambda_4 \cdot x_9$$

$$\frac{d}{dt}x_{55} = \lambda_1 \cdot x_{12}$$

$$\frac{d}{dt}x_{72} = \lambda_6 \cdot x_{14}$$

$$\frac{d}{dt}x_{22} = \lambda_3 \cdot x_2$$

$$\frac{d}{dt}x_{39} = \lambda_5 \cdot x_9$$

$$\frac{d}{dt}x_{56} = \lambda_3 \cdot x_{12}$$

$$\frac{d}{dt}x_{73} = \lambda_2 \cdot x_{15}$$

$$\frac{d}{dt}x_{23} = \lambda_4 \cdot x_2$$

$$\frac{d}{dt}x_{40} = \lambda_6 \cdot x_9$$

$$\frac{d}{dt}x_{57} = \lambda_4 \cdot x_{12}$$

$$\frac{d}{dt}x_{74} = \lambda_3 \cdot x_{15}$$

$$\frac{d}{dt}x_{24} = \lambda_5 \cdot x_2$$

$$\frac{d}{dt}x_{41} = \lambda_7 \cdot x_9$$

$$\frac{d}{dt}x_{58} = \lambda_5 \cdot x_{12}$$

$$\frac{d}{dt}x_{75} = \lambda_4 \cdot x_{15}$$

$$\frac{d}{dt}x_{25} = \lambda_6 \cdot x_2$$

$$\frac{d}{dt}x_{42} = \lambda_8 \cdot x_9$$

$$\frac{d}{dt}x_{59} = \lambda_6 \cdot x_{12}$$

$$\frac{d}{dt}x_{76} = \lambda_5 \cdot x_{15}$$

$$\frac{d}{dt}x_{26} = \lambda_8 \cdot x_2$$

$$\frac{d}{dt}x_{43} = \lambda_2 \cdot x_{10}$$

$$\frac{d}{dt}x_{60} = \lambda_8 \cdot x_{12}$$

$$\frac{d}{dt}x_{77} = \lambda_6 \cdot x_{15}$$

$$\frac{d}{dt}x_{27} = \lambda_1 \cdot x_7$$

$$\frac{d}{dt}x_{44} = \lambda_3 \cdot x_{10}$$

$$\frac{d}{dt}x_{61} = \lambda_1 \cdot x_{13}$$

$$\frac{d}{dt}x_{78} = \lambda_7 \cdot x_{15}$$

$$\frac{d}{dt}x_{28} = \lambda_3 \cdot x_7$$

$$\frac{d}{dt}x_{45} = \lambda_4 \cdot x_{10}$$

$$\frac{d}{dt}x_{62} = \lambda_3 \cdot x_{13}$$

$$\frac{d}{dt}x_{79} = \lambda_1 \cdot x_{16}$$

$$\frac{d}{dt}x_{29} = \lambda_4 \cdot x_7$$

$$\frac{d}{dt}x_{46} = \lambda_5 \cdot x_{10}$$

$$\frac{d}{dt}x_{63} = \lambda_4 \cdot x_{13}$$

$$\frac{d}{dt}x_{80} = \lambda_2 \cdot x_{16}$$

$$\frac{d}{dt}x_{30} = \lambda_5 \cdot x_7$$

$$\frac{d}{dt}x_{47} = \lambda_6 \cdot x_{10}$$

$$\frac{d}{dt}x_{64} = \lambda_5 \cdot x_{13}$$

$$\frac{d}{dt}x_{81} = \lambda_3 \cdot x_{16}$$

$$\frac{d}{dt}x_{31} = \lambda_6 \cdot x_7$$

$$\frac{d}{dt}x_{48} = \lambda_7 \cdot x_{10}$$

$$\frac{d}{dt}x_{65} = \lambda_6 \cdot x_{13}$$

$$\frac{d}{dt}x_{82} = \lambda_4 \cdot x_{16}$$

$$\frac{d}{dt}x_{32} = \lambda_2 \cdot x_8$$

$$\frac{d}{dt}x_{49} = \lambda_3 \cdot x_{11}$$

$$\frac{d}{dt}x_{66} = \lambda_8 \cdot x_{13}$$

$$\frac{d}{dt}x_{83} = \lambda_5 \cdot x_{16}$$

$$\frac{d}{dt}x_{33} = \lambda_3 \cdot x_8$$

$$\frac{d}{dt}x_{50} = \lambda_4 \cdot x_{11}$$

$$\frac{d}{dt}x_{67} = \lambda_1 \cdot x_{14}$$

$$\frac{d}{dt}x_{84} = \lambda_6 \cdot x_{16}$$

Відповідно для системи керування з першим пріоритетним елементом:

Ñèñòàìà 3

$$\frac{d}{dt}x_0 = \mu_1 \cdot x_1 + \mu_2 \cdot x_2 + \mu_7 \cdot x_7 + \mu_8 \cdot x_8 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_7 + \lambda_8) \cdot x_0$$

$$\frac{d}{dt}x_1 = \lambda_1 \cdot x_0 - \mu_1 \cdot x_1 - (\lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_7 + \lambda_8) \cdot x_1$$

$$\frac{d}{dt}x_2 = \lambda_2 \cdot x_0 - \mu_2 \cdot x_2 - (\lambda_1 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_7 + \lambda_8) \cdot x_2 + \mu_1 \cdot x_9 + \mu_1 \cdot x_{11} + \mu_7 \cdot x_{13}$$

$$\frac{d}{dt}x_3 = \lambda_3 \cdot x_0$$

$$\frac{d}{dt}x_4 = \lambda_4 \cdot x_0$$

$$\frac{d}{dt}x_5 = \lambda_5 \cdot x_0$$

$$\frac{d}{dt}x_6 = \lambda_6 \cdot x_0$$

$$\frac{d}{dt}x_7 = \lambda_7 \cdot x_0 - \mu_7 \cdot x_7 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_8) \cdot x_7 + \mu_2 \cdot x_{12} + \mu_8 \cdot x_{16}$$

$$\frac{d}{dt}x_8 = \lambda_8 \cdot x_0 - \mu_8 \cdot x_8 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_7) \cdot x_8 + \mu_1 \cdot x_{10} + \mu_7 \cdot x_{14} + \mu_1 \cdot x_{15}$$

$$\frac{d}{dt}x_9 = \lambda_2 \cdot x_1 - (\lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_7 + \lambda_8) \cdot x_9 - \mu_1 \cdot x_9$$

$$\frac{d}{dt}x_{10} = \lambda_8 \cdot x_1 - (\lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_7) \cdot x_{10} - \mu_1 \cdot x_{10}$$

$$\frac{d}{dt}x_{11} = \lambda_1 \cdot x_2 - (\lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_7 + \lambda_8) \cdot x_{11} - \mu_1 \cdot x_{11}$$

$$\frac{d}{dt}x_{12} = \lambda_7 \cdot x_2 - (\lambda_1 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_8) \cdot x_{12} - \mu_2 \cdot x_{12}$$

$$\frac{d}{dt}x_{13} = \lambda_2 \cdot x_7 - (\lambda_1 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_8) \cdot x_{13} - \mu_7 \cdot x_{13}$$

$$\frac{d}{dt}x_{14} = \lambda_8 \cdot x_7 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6) \cdot x_{14} - \mu_7 \cdot x_{14}$$

$$\frac{d}{dt}x_{15} = \lambda_1 \cdot x_8 - (\lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_7) \cdot x_{15} - \mu_1 \cdot x_{15}$$

$$\frac{d}{dt}x_{16} = \lambda_7 \cdot x_8 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6) \cdot x_{16} - \mu_8 \cdot x_{16}$$

$$\frac{d}{dt}x_{17} = \lambda_3 \cdot x_1$$

$$\frac{d}{dt}x_{34} = \lambda_4 \cdot x_8$$

$$\frac{d}{dt}x_{51} = \lambda_5 \cdot x_{11}$$

$$\frac{d}{dt}x_{68} = \lambda_2 \cdot x_{14}$$

$$\frac{d}{dt}x_{18} = \lambda_4 \cdot x_1$$

$$\frac{d}{dt}x_{35} = \lambda_5 \cdot x_8$$

$$\frac{d}{dt}x_{52} = \lambda_6 \cdot x_{11}$$

$$\frac{d}{dt}x_{69} = \lambda_3 \cdot x_{14}$$

$$\frac{d}{dt}x_{19} = \lambda_5 \cdot x_1$$

$$\frac{d}{dt}x_{36} = \lambda_6 \cdot x_8$$

$$\frac{d}{dt}x_{53} = \lambda_7 \cdot x_{11}$$

$$\frac{d}{dt}x_{70} = \lambda_4 \cdot x_{14}$$

$$\frac{d}{dt}x_{20} = \lambda_6 \cdot x_1$$

$$\frac{d}{dt}x_{37} = \lambda_3 \cdot x_9$$

$$\frac{d}{dt}x_{54} = \lambda_8 \cdot x_{11}$$

$$\frac{d}{dt}x_{71} = \lambda_5 \cdot x_{14}$$

$$\frac{d}{dt}x_{21} = \lambda 7 \cdot x_1$$

$$\frac{d}{dt}x_{22} = \lambda 3 \cdot x_2$$

$$\frac{d}{dt}x_{23} = \lambda 4 \cdot x_2$$

$$\frac{d}{dt}x_{24} = \lambda 5 \cdot x_2$$

$$\frac{d}{dt}x_{25} = \lambda 6 \cdot x_2$$

$$\frac{d}{dt}x_{26} = \lambda 8 \cdot x_2$$

$$\frac{d}{dt}x_{27} = \lambda 1 \cdot x_7$$

$$\frac{d}{dt}x_{28} = \lambda 3 \cdot x_7$$

$$\frac{d}{dt}x_{29} = \lambda 4 \cdot x_7$$

$$\frac{d}{dt}x_{30} = \lambda 5 \cdot x_7$$

$$\frac{d}{dt}x_{31} = \lambda 6 \cdot x_7$$

$$\frac{d}{dt}x_{32} = \lambda 2 \cdot x_8$$

$$\frac{d}{dt}x_{33} = \lambda 3 \cdot x_8$$

$$\frac{d}{dt}x_{38} = \lambda 4 \cdot x_9$$

$$\frac{d}{dt}x_{39} = \lambda 5 \cdot x_9$$

$$\frac{d}{dt}x_{40} = \lambda 6 \cdot x_9$$

$$\frac{d}{dt}x_{41} = \lambda 7 \cdot x_9$$

$$\frac{d}{dt}x_{42} = \lambda 8 \cdot x_9$$

$$\frac{d}{dt}x_{43} = \lambda 2 \cdot x_{10}$$

$$\frac{d}{dt}x_{44} = \lambda 3 \cdot x_{10}$$

$$\frac{d}{dt}x_{45} = \lambda 4 \cdot x_{10}$$

$$\frac{d}{dt}x_{46} = \lambda 5 \cdot x_{10}$$

$$\frac{d}{dt}x_{47} = \lambda 6 \cdot x_{10}$$

$$\frac{d}{dt}x_{48} = \lambda 7 \cdot x_{10}$$

$$\frac{d}{dt}x_{49} = \lambda 3 \cdot x_{11}$$

$$\frac{d}{dt}x_{50} = \lambda 4 \cdot x_{11}$$

$$\frac{d}{dt}x_{55} = \lambda 1 \cdot x_{12}$$

$$\frac{d}{dt}x_{56} = \lambda 3 \cdot x_{12}$$

$$\frac{d}{dt}x_{57} = \lambda 4 \cdot x_{12}$$

$$\frac{d}{dt}x_{58} = \lambda 5 \cdot x_{12}$$

$$\frac{d}{dt}x_{59} = \lambda 6 \cdot x_{12}$$

$$\frac{d}{dt}x_{60} = \lambda 8 \cdot x_{12}$$

$$\frac{d}{dt}x_{61} = \lambda 1 \cdot x_{13}$$

$$\frac{d}{dt}x_{62} = \lambda 3 \cdot x_{13}$$

$$\frac{d}{dt}x_{63} = \lambda 4 \cdot x_{13}$$

$$\frac{d}{dt}x_{64} = \lambda 5 \cdot x_{13}$$

$$\frac{d}{dt}x_{65} = \lambda 6 \cdot x_{13}$$

$$\frac{d}{dt}x_{66} = \lambda 8 \cdot x_{13}$$

$$\frac{d}{dt}x_{67} = \lambda 1 \cdot x_{14}$$

$$\frac{d}{dt}x_{72} = \lambda 6 \cdot x_{14}$$

$$\frac{d}{dt}x_{73} = \lambda 2 \cdot x_{15}$$

$$\frac{d}{dt}x_{74} = \lambda 3 \cdot x_{15}$$

$$\frac{d}{dt}x_{75} = \lambda 4 \cdot x_{15}$$

$$\frac{d}{dt}x_{76} = \lambda 5 \cdot x_{15}$$

$$\frac{d}{dt}x_{77} = \lambda 6 \cdot x_{15}$$

$$\frac{d}{dt}x_{78} = \lambda 7 \cdot x_{15}$$

$$\frac{d}{dt}x_{79} = \lambda 1 \cdot x_{16}$$

$$\frac{d}{dt}x_{80} = \lambda 2 \cdot x_{16}$$

$$\frac{d}{dt}x_{81} = \lambda 3 \cdot x_{16}$$

$$\frac{d}{dt}x_{82} = \lambda 4 \cdot x_{16}$$

$$\frac{d}{dt}x_{83} = \lambda 5 \cdot x_{16}$$

$$\frac{d}{dt}x_{84} = \lambda 6 \cdot x_{16}$$

За розглянутими вище системами диференціальних рівнянь, що відповідають різним видам обслуговування розраховано ймовірність безвідмовної роботи систем керування [16]. Також для процесу аналізу додано система, що знаходиться в стані ремонту.

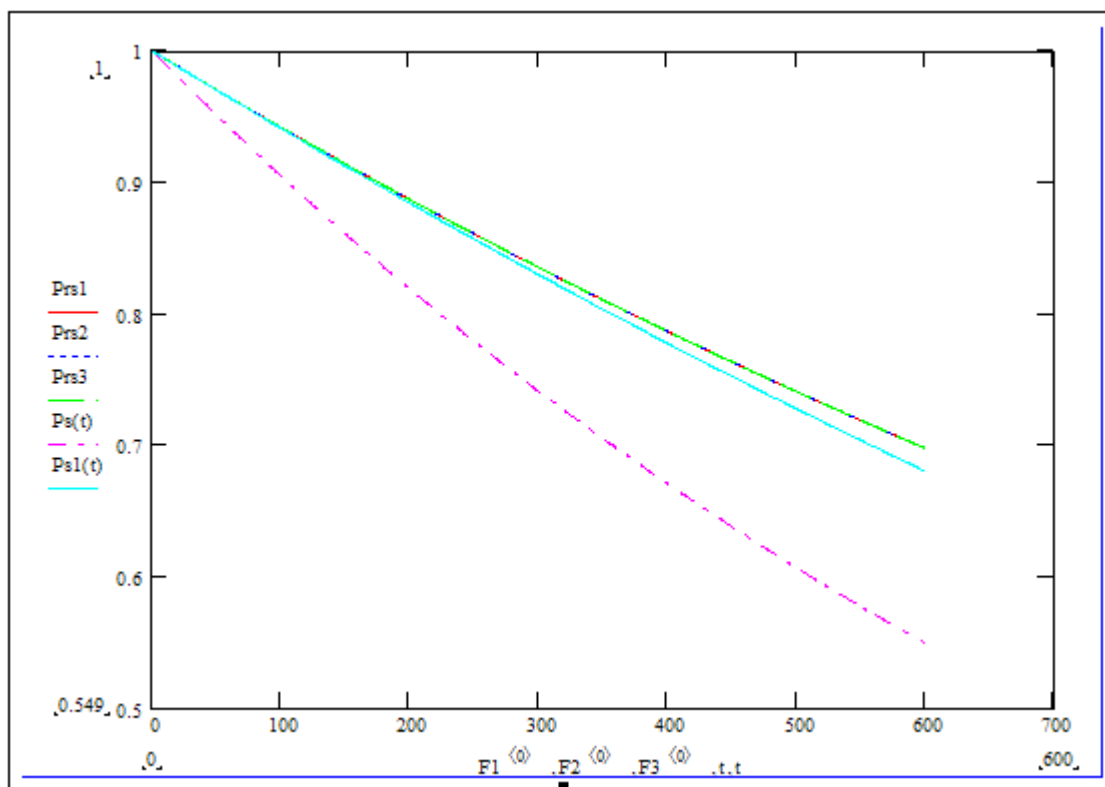


Рисунок 5.7. - Ймовірність безвідмовної роботи систем керування з різними видами обслуговування

На графіку представлено наступні системи обслуговування : Prs1 з прямим пріоритетом; Prs2 з зворотним пріоритетом; Prs3 з першим пріоритетним елементом; Ps1 - резервована; Ps – нерезервована не обслуговується.

Після проведених досліджень можна зробити певні висновки: проаналізувавши систему керування результат відповідає тому, що відповідний тип резервування надає плюс за часом приблизно 80 годин [16] . Це в порівнянні з нерезервованою системою, однак відновлення цієї системи керування дає надасть невеличку перевагу відносно не відновлюваної систем;

Виходячи із того, що для вибраного варіанту резервування вид обслуговування не впливає на якість системи керування, немає сенсу від відновлювання[16];

Для того щоб утримувати показник ймовірності безвідмовної роботи системи керування на рівні 0.9 потрібно проводити раз на 200 годин капітальний ремонт системи [16].

Рекомендацією що до підвищення якості системи може бути виклик ще одної бригади ремонту.

5.2. Розрахунок безвідмовної роботи системи з різними видами резервування та їх структурно-логічні схеми.

Вхідні данні [16]:

$$\lambda_1 := 4 \cdot 10^{-4} \quad \lambda_2 := 4 \cdot 10^{-4} \quad \lambda_3 := 4 \cdot 10^{-4} \quad \lambda_4 := 4 \cdot 10^{-4} \quad \lambda_5 := 2 \cdot 10^{-4} \quad \lambda_6 := 2 \cdot 10^{-4}$$

$$P_1(t) := e^{-\lambda_1 \cdot t} \quad P_2(t) := e^{-\lambda_2 \cdot t} \quad P_3(t) := e^{-\lambda_3 \cdot t} \quad P_6(t) := e^{-\lambda_6 \cdot t}$$

$$P_4(t) := e^{-\lambda_4 \cdot t} \quad P_5(t) := e^{-\lambda_5 \cdot t}$$

Системи представлені різних видів [16]

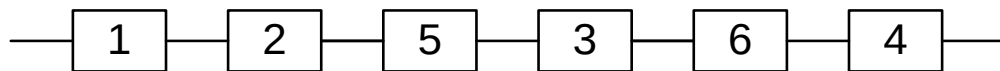


Рисунок 5.8. – Структурно-логічна схема ймовірності безвідмовної роботи

$$P_s(t) := P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot P_3(t) \cdot P_4(t) \cdot P_5(t) \cdot P_6(t)$$

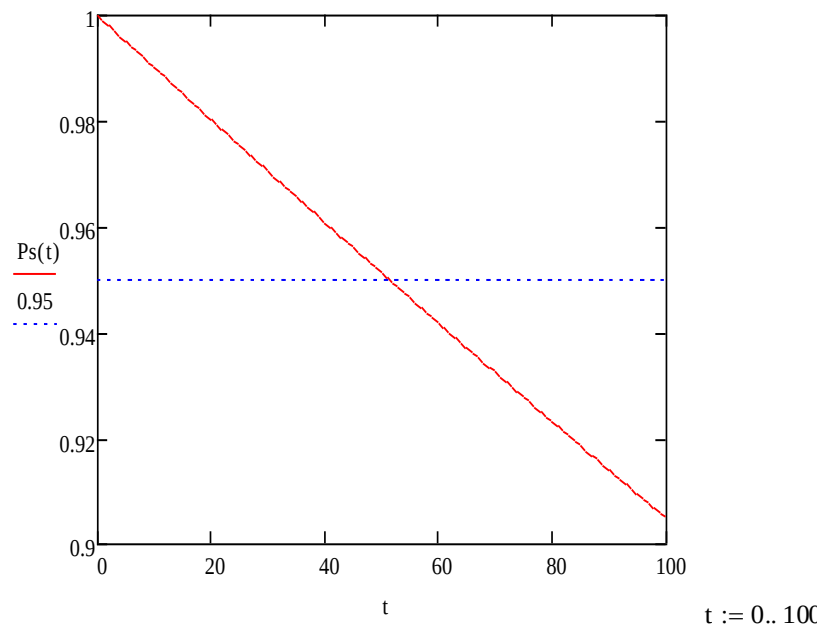


Рисунок 5.9. - Ймовірність безвідмовної роботи систем

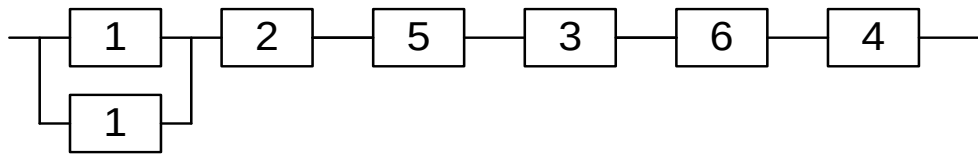


Рисунок 5.10. – Структурно-логічна схема ймовірності безвідмовної роботи

$$P_{s1}(t, k) := \left[1 - (1 - P_1(t))^{k+1} \right] \cdot P_2(t) \cdot P_3(t) \cdot P_4(t) \cdot P_5(t) \cdot P_6(t)$$

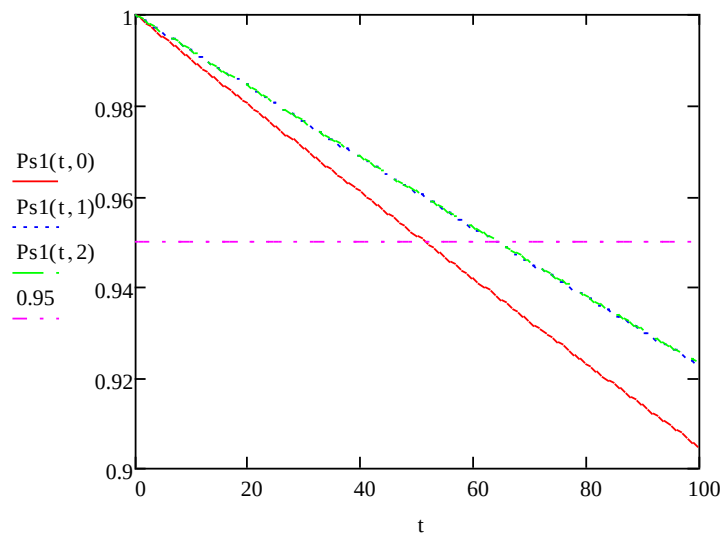


Рисунок 5.11. - Ймовірність безвідмовної роботи систем

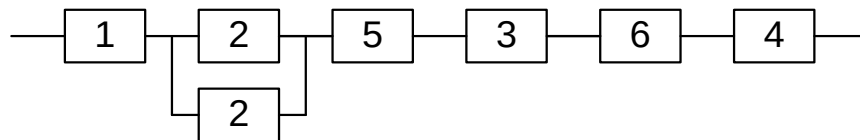


Рисунок 5.12. – Структурно-логічна схема ймовірності безвідмовної роботи

$$Ps2(t, k) := [1 - (1 - P2(t))^{k+1}] \cdot P1(t) \cdot P3(t) \cdot P4(t) \cdot P5(t) \cdot P6(t)$$

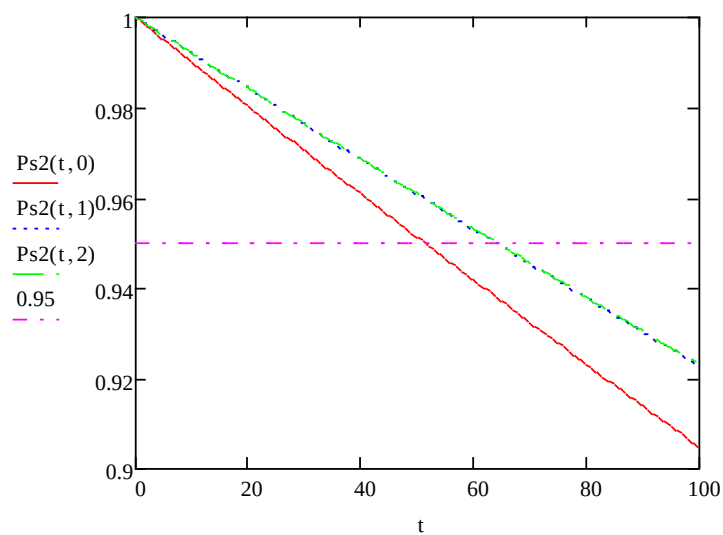


Рисунок 5.13. - Ймовірність безвідмовної роботи систем

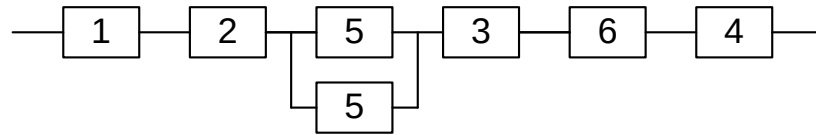


Рисунок 5.14. – Структурно-логічна схема ймовірності безвідмовної роботи

$$Ps3(t, k) := \left[1 - (1 - P5(t))^{k+1} \right] \cdot P2(t) \cdot P1(t) \cdot P4(t) \cdot P3(t) \cdot P6(t)$$

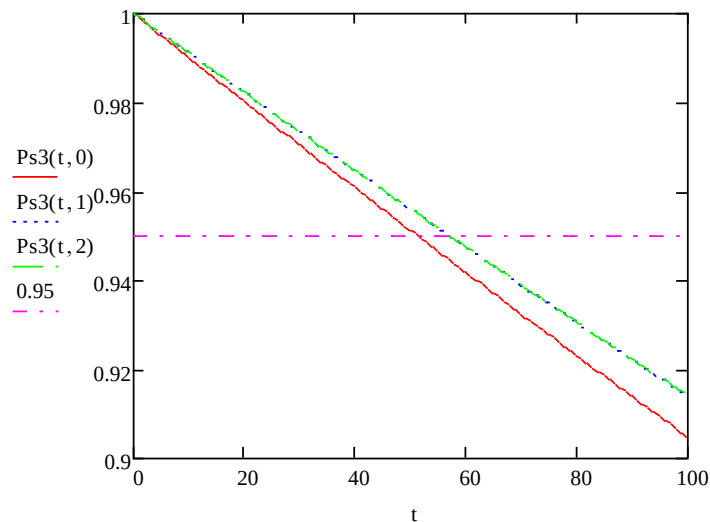


Рисунок 5.15. - Ймовірність безвідмовної роботи систем

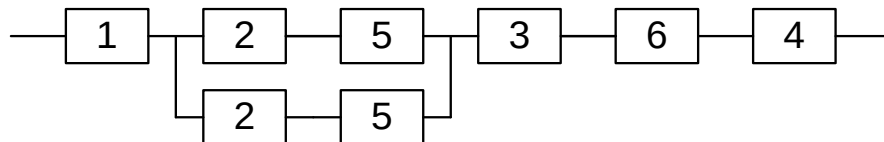


Рисунок 5.16. – Структурно-логічна схема ймовірності безвідмовної роботи

$$Ps9(t, k) := \left[1 - (1 - P2(t) \cdot P5(t))^{k+1} \right] \cdot P4(t) \cdot P3(t) \cdot P6(t) \cdot P1(t)$$

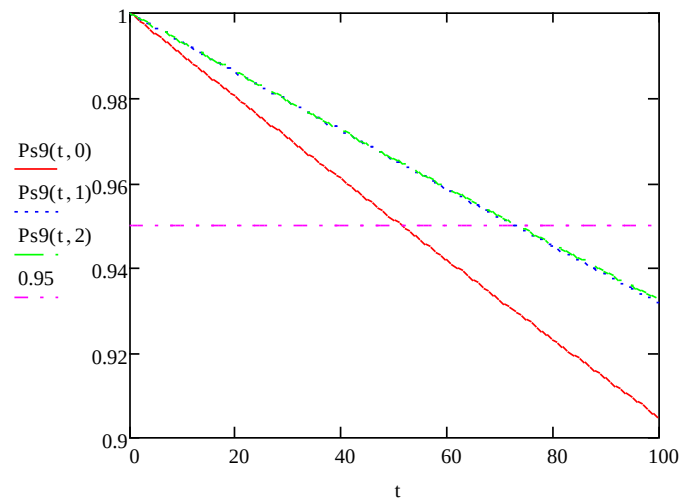


Рисунок 5.17. - Ймовірність безвідмовної роботи систем

Наробітки до моменту коли показник якості системи стає не більшим за 0.95 [16]

Таблиця 6.4. Порівняльний аналіз систем

Варіант схеми, що резервується	оригінал	1	2	3	4	5
Час наробітку (год)	52	65	65	57	86	74

РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

6.1. Поняття стартап-проєкту

Стартапом вважають молоді компанії, створені для розроблення інноваційного продукту або надання нової послуги. Основою стартап-проєктів є використання сучасних підходів та технологій для створення рішень, які усувають недоліки вже наявних конкурентних продуктів [17].

Ідея стартап-проєкту полягає у створенні сервісу, що інтегруватиметься зі SCADA-системою та забезпечуватиме аналітичне опрацювання даних, прогнозування й діагностику технологічного процесу. Це дозволить оперативно виявляти відхилення параметрів від нормативних значень, а також визначати можливі несправності датчиків і виконавчих механізмів, забезпечуючи безперебійну роботу виробництва. Окрім цього, система включатиме модуль менеджменту, який визначатиме ключові тенденції споживання сировини та сприятиме оптимізації процесів закупівлі [17].

Основні переваги проєкту для клієнтів

1. Формування комплексної системи контролю, яка забезпечуватиме ефективне керування всіма етапами виробничого процесу.
2. Аналітичне опрацювання даних із використанням методів машинного навчання для побудови прогнозних моделей, подальшої діагностики та виявлення ключових тенденцій.
3. Діагностика в режимі реального часу, що дає можливість порівнювати поточні значення параметрів (витрата, температура, концентрація тощо) з прогнозними та історичними даними. Це забезпечує швидке виявлення й усунення несправностей.

4. Система управління виробництвом, яка через аналіз даних визначає основні витрати сировини та формує “чек-листи” для оптимізації закупівельного процесу.

6.2. Технологічний аудит проекту

У табл.6.1 наведено результати проведення аудиту технологій, які можуть бути використані для реалізації даного проекту [17].

Таблиця 6.1 – Технологічна реалізація проекту

№	Ідея проекту	Технології, що будуть використані	Технології, що є в наявності	Доступність технології
1	Створення системи аналітичної обробки даних процесу	Python, NumPy, Scikit-learn, Pandas	Технологія наявна	Технологія доступна
2	Створення системи діагностування процесу задля виявлення		Технологія наявна	Технологія доступна
3	Створення інтерфейсу додатку, що буде взаємодіяти з основним інтерфейсом оператора SCADA системи	Python, Tkinter, Matplotlib	Технологія наявна	Технологія доступна

Аналіз ринкових можливостей запуску проекту

У табл.6.2 наведено визначені потенційні групи клієнтів створеного стартапу [17].

Таблиця. 6.2 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

Потреби, які формують ринок	Цільові аудиторії проекту	Різниця поведінки цільових груп споживачів	Основні вимоги споживачів
Потребою є стабільна робота процесу на виробництві	Підприємства які використовують або планують інтегрувати SCADA систему у виробництво	Різноманітність локальних технічних рішень для кожного виробництва	Стабільність роботи

У табл.6.3 та табл. 6.4 наведено визначені фактори загроз та можливостей [17]. Факторами загроз відповідають ті фактори, що спроможні завадити ринковому впровадженню проекту. Відповідно фактори можливостей – ті фактори, що добре впливають на ринкове впровадження проекту.

Таблиця 6.3 – Фактори загроз

<i>Фактор</i>	<i>Зміст загрози</i>	<i>Можлива реакції компанії</i>
Специфічні технічні рішення	На підприємстві, під час розробки SCADA системи могли бути використані нетипові технічні рішення	Модернізація системи під конкретні умови виробництва

Таблиця. 6.4 – Фактори можливостей

Фактор	Зміст можливості	Можлива реакції компанії
Уніфікація рішень	Рішення, що були розроблені для одного виробництва можуть бути застосовані у повному чи частковому об'ємі до інших підприємств	Використання менших ресурсів для вирішення задач
Підтримка стабільності системи	Даний продукт є сервісом, тому обслуговування та модернізацію системи буде проводитися дистанційно	Оперативне вирішення задач без значних матеріальних затрат

За допомогою проведеного аналізу у табл.6.5 виявлено конкретні фактори конкурентного середовища: тип конкуренції; рівень конкурентної боротьби; галузеву ознаку проекту; конкуренції за видом товарів; характер конкурентних переваг; інтенсивність [17].

Таблиця. 6.5– Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	Суть проявлення даної характеристики	Кроки компанії для підтримки конкурентоспроможності
--------------------------------------	--------------------------------------	---

Тип конкуренції: <i>чиста</i>	Вплив на ринок здійснюється відповідно характеристик системи: стабільність роботи, використання сучасних технологій, тощо	Підвищення кваліфікації персоналу задля покращення роботи сервісу
За рівнем конкурентної боротьби: <i>міжнаціональний</i>	Даний проект позиціонується як сервіс, тому його можна використовувати у всьому світі. Через це формується більша конкуренція на дану галузь	Створення рекламних компаній продукту задля якомога більшої популяції
За галузевою ознакою: <i>внутрішньогалузева</i>	Використання сервісу спрямовано лише роботу з SCADA системами	Розширювати функціонал системи для використання у інших галузях
Конкуренція за видами товарів: <i>товарно-видова</i>	Кожна система буде мати різні властивості залежно від виробництва	Розширення функціоналу системи
За характером конкурентних переваг: <i>нецінова</i>	Рішення запропоновані компанією можуть відрізнитися від ринкових	Змінення цінової політики в залежності від підписаних контрактів (зменшення вартості в залежності від терміну співпраці)
За інтенсивністю: <i>марочна</i>	В контексті міжнародної співпраці створення бренду дасть змогу більш швидко закріпитися на ринку та знайти клієнтів	Популяризація бренду

Відповідно до комплексної ідеї стартап-проекту та у результатах попередніх досліджень у табл.6.1 – табл.6.5 у табл.6.6 представлено обґрунтування факторів конкурентоспроможності [17].

Таблиця. 6.6 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

Фактор конкурентоспроможності	Фактори для порівняння з конкурентами
-------------------------------	---------------------------------------

Одна система для всіх функцій	Клієнтам не треба інтегрувати декілька систем в одне ціле, що може чинити ряд проблем з сумісністю сервісів
-------------------------------	---

Розробка ринкової стратегії проекту. У табл.6.7 наведено визначено базову стратегію конкурентної поведінки [17].

Таблиця. 6.7 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, аби забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і як?	Стратегія конкурентної поведінки
Ні, даний проект не є «першопрохідцем», оскільки вже існує багато альтернативних проектів	Компанія буде створювати умови та оновлювати функціонал системи для залучення нових клієнтів	Враховуючи специфіку бізнесу у якому працює компанія деякі характеристики та функції будуть схожі з конкурентами	Стратегія наслідування лідера

Розробка ринкової стратегії проекту. Представлено та визначено конкретні переваги концепції потенційного продукту та сформовану систему збуту [17].

Таблиця. 6.8 – Визначення ключових переваг концепції потенційного продукту

Потреба	Переваги товару, який пропонує компанія	Ключові переваги перед конкурентами
Стабільна система для менеджменту та з функціоналом predicted-maintenance	Компанія пропонує весь функціонал в одній системі, що буде інтегровано у SCADA	Продукт має широкий функціонал та дозволяє клієнтам матеріально заощадити на єдиній системі.

Таблиця. 6.9 – Формування системи збуту

<i>Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Функції збуту, які має виконувати постачальник товару</i>	<i>Глибина каналу збуту</i>	<i>Оптимальна система збуту</i>
Клієнтам вигідніше підписати контракт на більш довгий строк, оскільки це дасть змогу заощадити на користуванні продуктом	Реклама, пошук клієнтів, аналіз попиту на ринку	Нульовий	Вертикальна маркетингова система

ВИСНОВКИ

У процесі виконання дисертації було проведено комплексне дослідження технології гідроочищення нафтових масел та розроблено систему автоматизації установки, яка забезпечує стабільну якість кінцевого продукту, підвищення ефективності виробництва і безпеку технологічного процесу. Було проаналізовано сучасні методи очищення нафтових масел, визначено основні технологічні параметри процесу, такі як температура, тиск, витрата сировини, кількість водню та активність каталізатора. Встановлено, що найважливішими параметрами, які впливають на якість очищення, є температура реактора, тиск водню та співвідношення водень–сировина. Досліджено послідовність основних етапів гідроочищення: підготовка сировини, нагрівання, реакція гідрогенізації, сепарація, ректифікація та охолодження. Проведено опис технологічної схеми установки гідроочищення нафтових масел, обґрунтовано вибір технологічного обладнання та допоміжних систем.

Розроблено структурну схему автоматичного керування установкою. Обґрунтовано вибір засобів вимірювання, регулювання та сигналізації. Запропоновано математична модель трубчастої печі, каскадна система керування температурою в апараті, представлено аналіз порівняння відносно ПІД-регулятора.

Розроблена система автоматизації установки гідроочищення нафтових масел є технічно обґрунтованою, економічно доцільною і забезпечує підвищення ефективності та надійності роботи технологічного комплексу

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Назаренко В.І. Автоматизація хімічних виробництв. – К.: Либідь, 2019. – 320 с.
2. Козак Ю.О. Технологічні процеси переробки нафти. – Харків: ХНТУ, 2021. – 278 с.
3. Іваненко С.В. Системи автоматичного регулювання в нафтопереробці. – Одеса: ОНАХТ, 2018. – 210 с.
4. Бабіченко, А. К. Промислові засоби автоматизації: навч. посіб.: У 2 ч. / А. К. Бабіченко, В. І. Тошинський, В. С. Михайлов та ін.; за заг. ред. А. К. Бабіченка. – Х.: НТУ «ХП», 2003. – Ч. 1. Вимірювальні пристрої. – 470 с. : іл. – Бібліогр.: с. 467. – 500 пр. – ISBN 966-593-232-2.
5. Бабіченко, А. К. Промислові засоби автоматизації: навч. посіб.: У 2 ч. / А. К. Бабіченко, В. І. Тошинський, В. С. Михайлов та ін.; За заг. ред. А. К. Бабіченка. – Х.: НТУ «ХП», 2003 р. – Ч. 2. Регулювальні і виконавчі пристрої. – 658 с. : іл. – Бібліогр.: с. 644–645. – 500 пр. – ISBN 966-593-292-6.
6. Гончарук П.П. Гідроочищення нафтових продуктів. – К.: Техніка, 2017. – 296 с.
7. Пирог О.Г. Технологія нафти і газу. – К.: НАУ, 2020. – 340 с.
8. Бондар О.В. SCADA-системи промислової автоматизації. – Харків: НТУ «ХП», 2019. – 188 с.
9. Копилов В.М. Автоматизація технологічних процесів нафтохімії. – Дніпро: ДНУ, 2022. – 256 с.
10. Лукінюк, М. В. Технологічні вимірювання та прилади: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / М. В. Лукінюк. – К.: НТУУ «КП», 2007. – 436 с.
11. Остапенко Ю.О. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів керування / Ю.О. Остапенко – Київ : Задруга, 1999. – 420 с.
12. Єгоров В.П. Контроль і керування процесами в хімічній промисловості. – К.: Вища школа, 2018.
13. Siemens AG. SIMATIC S7-1200 System Manual. – Munich, 2022.

14. ABB Automation. Process Control Systems for Refinery Applications. – Zurich, 2021.
15. Жученко А.І., Ярощук Л.Д. Спеціальні розділи математики для дослідження комп'ютерних систем: Навч. посіб. – К. : ІВЦ «Видавництво “Політехніка”», 2002. -208 с.
16. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Математические методы в теории надежности / Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев – К: Наука, 1965 - 524с.
17. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : «КПІ ім Ігоря Сікорського», 2016. – 28 с