

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 виробництва полівінілацетату

Виконав: студент 2 курсу, групи ЛК-42мп
(шифр групи)

Дяченко Олександр Вікторович
(прізвище, ім'я, по-батькові) (підпис)

Керівник асис. Сергійчук І.С.
(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**

Дяченко Олександр Вікторович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Автоматизація процесу виробництва полівінілацетату

керівник проекту _____
асис. Сергійчук І.С.
(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 виробництва полівінілацетату _____

4. Вихідні дані: Схема автоматизації; система керування яка має забезпечувати перерегулювання не більше 10%, час перехідного процесу не більше заданим регламентом меж; параметри які підлягають керуванню: вихідна температура продукту з реактора, витата пальног, витрата продукту на вході до реактора

5. Перелік завдань, що потребують розробки: Дослідити процес виробництва полівінілацетату; розробка математичної моделі реактора як технологічного

об'єкту керування; спроектувати та дослідити систему керування автоклавом;
розробка стартап проекту.

6. Орієнтовний перелік графічного(ілюстративного) матеріалу Графічні зображення об'єкту керування; схема процесу виробництва полівінілацетату; перехідні характеристики об'єкту; зображення розробленої систем керування; графіки функцій належності, 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	Дослідження роботи системи		
5	Проектування схеми автоматизації		
6	Створення стартап проекту		

Студент _____

Олександр ДЯЧЕНКО
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

Іван СЕРГІЙЧУК
(ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту.

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація записку об'ємом 62 сторінок, 18 рисунків, 1 креслення і 23 літературних джерел.

Основною метою дисертації є розробка системи автоматичного контролю хіміко технологічного процесу виробництва полівінілацетату, для забезпечення мінімізального втручання людини та використання людського ресурсу у виробництво, а також підвищення енергоефективності при отриманні вихідного продукту та економне використання енергетичних ресурсів.

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

Одним з основних апаратів, що забезпечує яскравий перебіг технологічного процесу виступає реактор, для якого розроблені та досліджені математична модель у вигляді матеріального та теплового балансу, отримано статичні характеристики, побудовано перехідну характеристику за каналом керування.

Проведено синтез системи керування для одноконтурної замкної з ПІД регулятором, проведено імітаційне моделювання та розроблено SCADA-систему керування технологічним процесом.

Розроблено стартап проекту, що дозволив виявити економічну доцільність прийнятих технічних рішень, а також проведено аналіз ринку та порівняння із існуючими аналогами.

Ключові слова: реактор, полівінілацетат, об'єкт керування, схема автоматизації, математична модель, тепловий баланс, передатна функція, перехідна характеристика, канал керування, імітаційне моделювання, алгоритм керування.

ABSTRACT

Master's thesis note with a volume of 62 pages, 18 figures, 1 drawing and 23 literary sources.

The main goal of the dissertation is to develop an automatic control system for the chemical and technological process of polyvinyl acetate production, to ensure minimal human intervention and the use of human resources in production, as well as increasing energy efficiency when obtaining the initial product and economical use of energy resources.

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

One of the main devices that ensures the high-quality course of the technological process is the reactor, for which a mathematical model in the form of a material and heat balance has been developed and studied, static characteristics have been obtained, and a transient characteristic has been constructed along the control channel.

A control system for a single-loop closed-loop with a PID regulator has been synthesized, simulation modeling has been carried out and a SCADA process control system has been developed.

A startup project has been developed, which has allowed to identify the economic feasibility of the adopted technical solutions, as well as a market analysis and comparison with existing analogues.

Keywords: reactor, polyvinyl acetate, control object, automation scheme, mathematical model, heat balance, transfer function, transient response, control channel, simulation modeling, control algorithm.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС ВИРОБНИЦТВА ПОЛІВІНІЛАЦЕТАТУ. .9	
1.1. Загальна характеристика процесу виробництва полівінілацетату.....9	
1.2. Технологічна схема виробництва	10
1.3. Постановка задачі на дослідження.....	14
2. ОПИС СХЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ВИРОБНИЦТВА ПОЛІВІНІЛАЦЕТАТУ.....	16
2.1. Опис схеми автоматизації технологічного виробництва полівінілацетату.....	16
2.2. Основні функціональні блоки	19
3. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОБ'ЄКТУ КЕРУВАННЯ.....	24
3.1. Дослідження об'єкту керування.....	24
3.2. Матеріальний та тепловий баланс реактора	26
4. СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....	33
4.1. Синтез системи керування з ПД-регулятором.....	33
4.2. Алгоритм функціонування програмної імітаційної моделі реактора...34	
5. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ	41
5.1. Поняття стартап-проекту.....	41
5.2. Загальні підходи до економічного обґрунтування.....	43
5.3. Структура споживання та сегменти ринку.....	53
ВИСНОВКИ	58
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	61

ВСТУП

Сучасний розвиток хімічної та нафтохімічної промисловості характеризується зростанням вимог до якості продукції, енергоефективності виробництв та екологічної безпеки технологічних процесів. Одним із важливих напрямів хімічної промисловості є виробництво полімерних матеріалів, зокрема полівінілацетату, який широко застосовується у виробництві клеїв, лакофарбових матеріалів, паперової та деревообробної продукції, а також у будівельній галузі.

Полівінілацетат отримують переважно методом емульсійної полімеризації вінілового ацетату у водному середовищі з використанням ініціаторів та емульгаторів. Даний процес є складним з точки зору керування, оскільки супроводжується значним виділенням тепла, має виражену нелінійність, інерційність та чутливість до коливань технологічних параметрів. Порушення температурного режиму або співвідношення компонентів може призвести до зниження ступеня полімеризації, погіршення реологічних властивостей продукту та зростання частки браку.

На більшості діючих підприємств процес виробництва полівінілацетату керується за допомогою локальних регуляторів з обмеженими можливостями моніторингу та оптимізації. Відсутність інтегрованих систем автоматичного керування та сучасних SCADA-рішень ускладнює оперативне управління процесом, знижує стабільність якості готової продукції та підвищує залежність результатів виробництва від людського фактора. У зв'язку з цим актуальною є задача розробки та впровадження ефективних автоматизованих систем керування технологічним процесом виробництва полівінілацетату.

Застосування математичного моделювання, цифрових систем керування та сучасних програмно-технічних засобів автоматизації дозволяє забезпечити стабільний температурний режим реактора полімеризації, оптимізувати витрати

сировини та енергоносіїв, а також підвищити безпеку експлуатації обладнання. Особливу увагу при цьому доцільно приділити використанню адаптивних та прогнозних методів керування, які забезпечують високу якість регулювання в умовах змінних навантажень та збурень.

Метою магістерської дисертації є розробка автоматизованої системи керування процесом виробництва полівінілацетату на основі математичного моделювання реактора емульсійної полімеризації з використанням сучасних методів автоматичного керування та SCADA-систем.

Для досягнення поставленої мети в роботі передбачено вирішення таких завдань:

- проведення аналізу технологічного процесу виробництва полівінілацетату та визначення основних параметрів, що підлягають автоматизації;
- розробка математичної моделі процесу емульсійної полімеризації вінілового ацетату з урахуванням матеріальних та теплових балансів;
- синтез та дослідження системи автоматичного керування температурним режимом реактора полімеризації;
- моделювання роботи системи керування з використанням програмних середовищ MATLAB/Simulink;
- розробка функціональної та структурної схем автоматизації процесу;
- створення SCADA-системи для моніторингу та диспетчеризації виробництва;
- оцінка економічної ефективності впровадження автоматизованої системи керування.

Об'єктом дослідження у даній роботі є технологічний процес емульсійної полімеризації вінілового ацетату у реакторі з мішалкою. Предметом дослідження є методи та засоби автоматичного керування

температурою та основними параметрами процесу виробництва полівінілацетату.

Наукова новизна роботи полягає у розробці та дослідженні математичної моделі процесу полімеризації з подальшим використанням сучасних методів автоматичного керування для підвищення стабільності та ефективності виробництва.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання розробленої системи автоматизації для модернізації існуючих або проектування нових установок виробництва полівінілацетату з метою підвищення якості продукції, зниження енергетичних витрат та покращення умов експлуатації обладнання.

1. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС ВИРОБНИЦТВА ПОЛІВІНІЛАЦЕТАТУ

1.1. Загальна характеристика процесу виробництва полівінілацетату

Полівінілацетат (ПВАц) є одним із найбільш поширених синтетичних полімерів, що широко використовується в різних галузях промисловості завдяки поєднанню задовільних фізико-механічних властивостей, технологічності та відносно низької собівартості. Він являє собою термопластичний полімер, отриманий шляхом полімеризації вінілового ацетату, та зазвичай випускається у вигляді водних дисперсій (латексів).

Основними сферами застосування полівінілацетату є:

- виробництво клеїв для деревини, паперу, картону та полімерних матеріалів;
- лакофарбова промисловість (водорозчинні фарби та ґрунтовки);
- будівельна галузь (клеї, шпаклівки, модифікуючі добавки);
- текстильна промисловість;
- паперова промисловість як зв'язувальна та покривна речовина.

Якість полівінілацетату визначається такими показниками, як молекулярна маса, ступінь полімеризації, в'язкість дисперсії, стабільність латексу та вміст залишкового мономеру. Усі зазначені показники суттєво залежать від режимів ведення технологічного процесу, що обумовлює необхідність його точного та надійного автоматичного керування.

Фізико-хімічні властивості вінілового ацетату та полівінілацетату

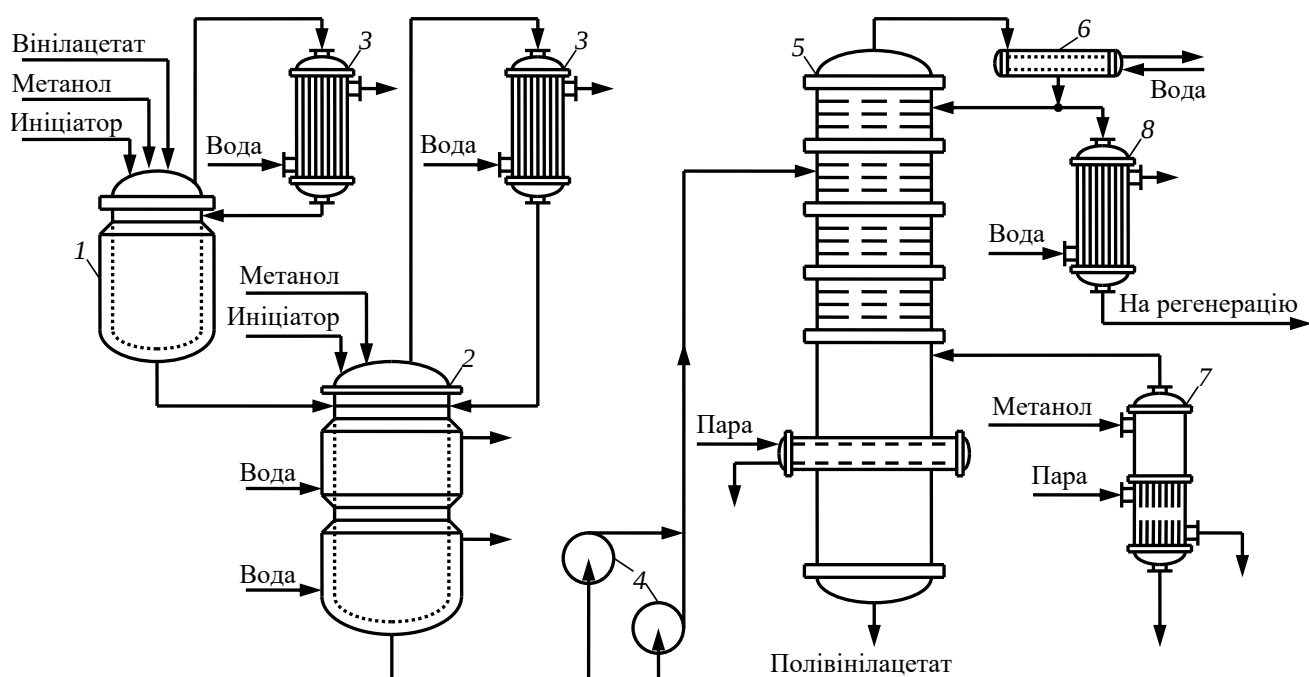
Вініловий ацетат є безбарвною леткою рідиною з характерним запахом, температурою кипіння близько 72 °C та високою реакційною здатністю. Він легко полімеризується під дією вільнорадикальних ініціаторів, що робить його придатним для промислової емульсійної полімеризації.

Полівінілацетат характеризується такими властивостями:

- щільність: 1,18–1,20 г/см³;
- температура склування: 28–35 °С;
- висока адгезія до пористих матеріалів;
- добра плівкоутворювальна здатність;
- чутливість властивостей до температури та швидкості полімеризації.

Особливістю процесу полімеризації вінілового ацетату є значне тепловиділення, що зумовлює ризик перегріву реакційної маси та втрати контролю над процесом. Тому стабілізація температурного режиму є ключовою задачею автоматизації.

1.2. Технологічна схема виробництва



1, 2 – полімеризатори; 3, 6, 8 – теплообмінники; 4 – насоси; 5 – ректифікаційна колонна; 7 – випаровувач.

Рисунок. 1.1 - Схема процесу виробництва полівінілацетату безперервним способом

Промислове виробництво полівінілацетату здійснюється такими методами:

- масова полімеризація;
- розчинна полімеризація;
- емульсійна полімеризація.

Найбільш поширеним та економічно доцільним є метод емульсійної полімеризації, оскільки він забезпечує:

- ефективний відвід тепла;
- можливість отримання продукту у вигляді готової водної дисперсії;
- високий ступінь полімеризації;
- стабільні властивості кінцевого продукту.

У зв'язку з цим у даній роботі розглядається саме емульсійний метод виробництва полівінілацетату як об'єкт автоматизації.

Опис технологічної схеми виробництва полівінілацетату

Типова апаратурно-технологічна схема виробництва полівінілацетату включає такі основні елементи:

- ємності для зберігання вінілового ацетату;
- вузол підготовки водної фази;
- дозувальні системи подачі мономеру, ініціатора та емульгатора;
- реактор емульсійної полімеризації з мішалкою та теплообмінною рубашкою;
- теплообмінники;
- апарати стабілізації та охолодження дисперсії;
- ємності для готового продукту.

Процес є періодичним або напівперіодичним, що ускладнює реалізацію автоматизованого керування та потребує гнучких алгоритмів регулювання.

Реактор емульсійної полімеризації як об'єкт керування

Основним апаратом процесу є реактор з мішалкою, оснащений теплообмінною рубашкою або внутрішніми теплообмінними елементами. У реакторі відбуваються такі основні процеси:

- ініціація полімеризації;
- ріст полімерних ланцюгів;
- передача тепла через стінки реактора.

Реактор характеризується:

- значною тепловою інерцією;
- нелінійною динамікою;
- наявністю запізнення за температурою.

З точки зору теорії автоматичного керування реактор полімеризації є складним багатопараметричним об'єктом з істотними збуреннями.

Теплові та матеріальні процеси в реакторі

Процес полімеризації вінілового ацетату є екзотермічним, а тепловиділення пропорційне швидкості реакції. При цьому:

- надлишкове тепло може спричинити дестабілізацію латексу;
- недостатній температурний рівень призводить до зниження конверсії мономеру.

Матеріальні потоки включають:

- подачу мономеру;
- подачу водної фази та добавок;

- відведення готового продукту.

Контроль співвідношення потоків є критичним для стабільності процесу.

Основні технологічні параметри та їх вплив на якість продукту

До основних параметрів належать:

- температура реакційної маси;
- швидкість подачі мономеру;
- концентрація ініціатора;
- швидкість перемішування;
- тиск у реакторі.

Коливання будь-якого з перелічених параметрів безпосередньо впливають на:

- молекулярну масу полімеру;
- в'язкість дисперсії;
- стабільність латексу.

Аналіз збурень та нестабільностей процесу

До основних збурень відносяться:

- коливання температури охолоджувача;
- зміна якості сировини;
- нестабільність подачі ініціатора;
- зношування теплообмінних поверхонь.

Ці фактори ускладнюють роботу класичних систем керування та обґрунтовують доцільність використання адаптивних та прогнозних методів регулювання.

Вимоги до автоматизації процесу виробництва полівінілацетату

Основними вимогами до системи автоматизації є:

- забезпечення стабільного температурного режиму;
- мінімізація коливань технологічних параметрів;
- підвищення рівня безпеки;
- зниження впливу людського фактора;
- можливість інтеграції SCADA-системи.

В результаті аналізу технологічного процесу виробництва полівінілацетату встановлено, що процес емульсійної полімеризації є складним, нелінійним та енергоємним об'єктом керування. Основним параметром, що визначає якість готової продукції, є температура реакційної маси, стабілізація якої потребує застосування сучасних автоматизованих систем керування. Проведений аналіз підтверджує доцільність розробки математичної моделі реактора та синтезу ефективної системи автоматичного керування, що і є предметом подальших розділів роботи.

1.3. Постановка задачі на дослідження

Метою дисертації є розробка системи автоматичного контролю процесу виробництва полівінілацетату. Це включає, створення схеми автоматизації дослідження математичної моделі реактора, як об'єкту керування, синтез системи керування.

Для вирішення поставлених задач дослідження включають:

1. Провести аналіз технологічного процесу та виявити ключові параметри, що впливають на якість полівінілацетату.
2. Запропонувати математичну модель реактора.

3. Виконати аналіз можливих методів та обрати оптимальну структуру системи керування.
4. Синтезувати нечітку систему керування
5. Обґрунтувати вибір технічних засобів автоматизації.
6. Розробити проект автоматизованої системи контролю та управління.

2. ОПИС СХЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ВИРОБНИЦТВА ПОЛІВІНІЛАЦЕТАТУ

2.1. Опис схеми автоматизації технологічного процесу установки виробництва полівінілацетату

Загальні принципи побудови програмно-технічного комплексу

Сучасна автоматизована система керування технологічним процесом виробництва полівінілацетату повинна забезпечувати надійне, безперервне та безпечне функціонування обладнання з мінімальним втручанням оператора. Програмно-технічна реалізація такої системи базується на принципах ієрархічної побудови АСУ ТП, що передбачає поділ функцій керування між різними рівнями.

У структурі системи автоматизації виділяють такі рівні:

- польовий рівень (датчики, виконавчі механізми);
- рівень керування (програмований логічний контролер);
- рівень диспетчеризації та візуалізації (SCADA-система).

Зазначена структура забезпечує масштабованість, гнучкість та можливість подальшої модернізації системи.

Вибір та обґрунтування технічних засобів автоматизації

Датчики технологічних параметрів

Для контролю основних параметрів процесу емульсійної полімеризації використовуються такі типи датчиків:

Датчики температури

- термоперетворювачі опору типу Pt100;

- клас точності не нижче А;
- діапазон вимірювання: 0–150 °С.

Датчики тиску

- мембранні перетворювачі тиску;
- діапазон: 0–0,6 МПа;
- вихідний сигнал 4–20 мА.

Датчики витрати

- електромагнітні або коріолісові витратоміри;
- застосовуються для контролю подачі мономеру та охолоджувача.

Датчики рівня

- гідростатичні або ємнісні;
- використовуються для контролю рівня в реакторі та ємностях.

Виконавчі механізми

До складу виконавчих механізмів входять:

- регулюючі клапани з електроприводом;
- частотні перетворювачі приводів мішалки;
- насосні агрегати з плавним регулюванням продуктивності.

Використання частотного керування дозволяє:

- зменшити енергоспоживання;
- знизити механічні навантаження;
- підвищити точність регулювання.

Програмований логічний контролер та його конфігурація

Вибір ПЛК

Для реалізації системи автоматизації доцільно використовувати промисловий ПЛК середнього класу, наприклад:

- Siemens SIMATIC S7-1500;
- Schneider Electric Modicon M340;
- Allen-Bradley CompactLogix.

Контролер повинен забезпечувати:

- достатню кількість аналогових і дискретних входів/виходів;
- підтримку ПІД-алгоритмів;
- обмін даними з SCADA по промислових протоколах.

Структурна схема ПЛК

Опис	структурної	схеми
------	-------------	-------

На структурній схемі показано:

- підключення датчиків температури, тиску, витрати;
- зв'язок ПЛК з виконавчими механізмами;
- комунікацію з SCADA-системою.

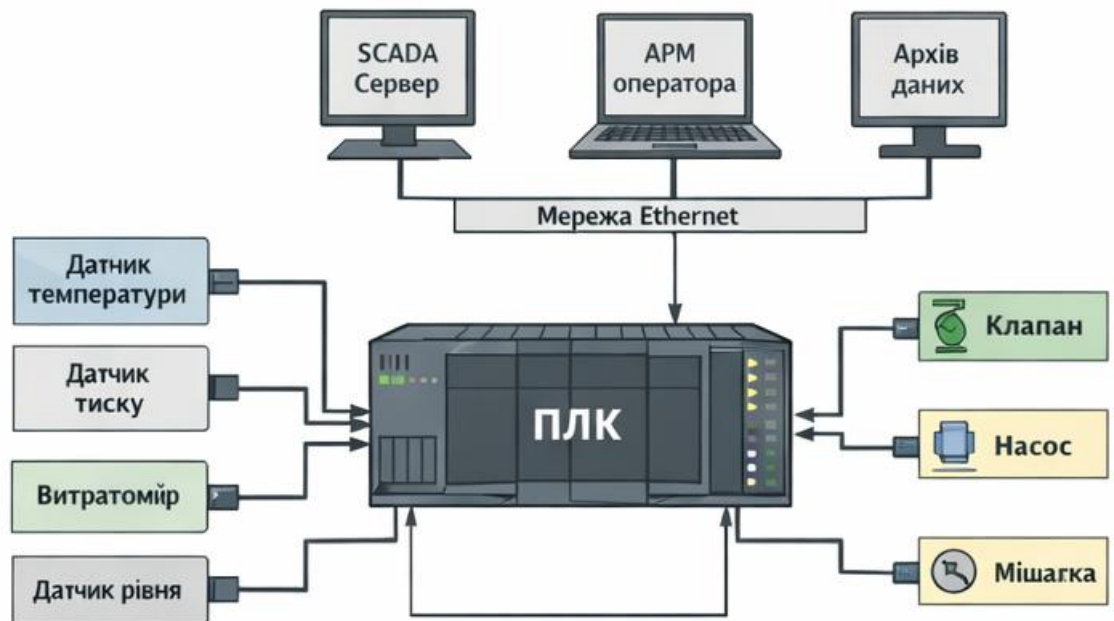


Рисунок 2.1 Структурна схема програмно-технічного комплексу

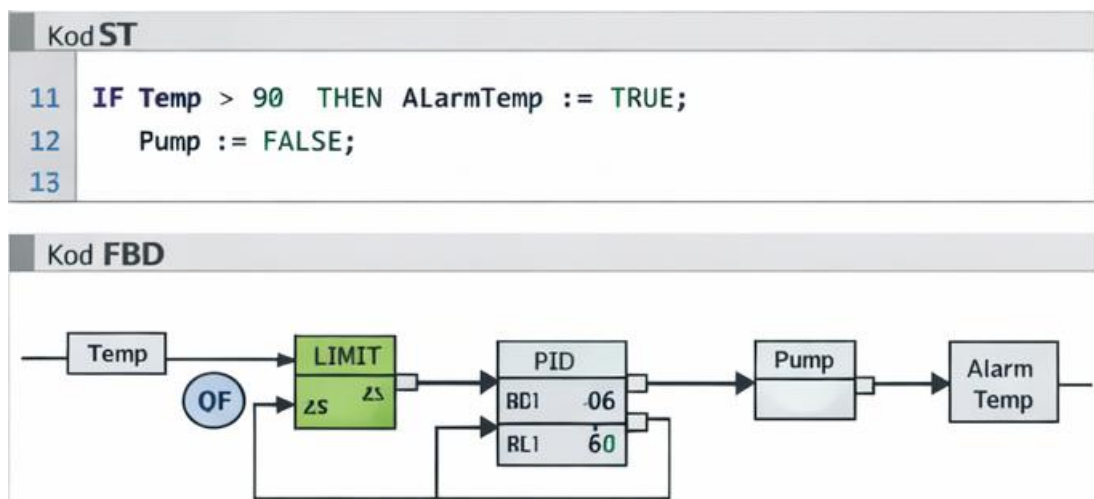


Рисунок 2.2 Код ПЛК

2.2. Основні функціональні блоки

Функціональна схема автоматизації (ФСА)

Функціональна схема автоматизації розроблена відповідно до вимог ДСТУ та включає:

- контури автоматичного регулювання;
- сигнальні та аварійні ланцюги;
- засоби контролю та індикації.

Основні контури регулювання:

- контур регулювання температури реактора;
- контур регулювання витрати охолоджувача;
- контур контролю тиску;
- контур керування мішалкою.

Алгоритми керування технологічним процесом

Алгоритм пуску установки

Алгоритм пуску включає такі етапи:

1. перевірка готовності обладнання;
2. заповнення реактора водною фазою;
3. запуск мішалки;
4. плавна подача мономеру;
5. включення системи автоматичного регулювання.

Алгоритм нормальної роботи

У режимі нормальної роботи ПЛК:

- підтримує задану температуру реактора;
- регулює подачу охолоджувача;
- контролює аварійні параметри.

Аварійні алгоритми

При виникненні аварійних ситуацій:

- перевищення температури;
- зростання тиску;
- відмова датчика;

контролер переходить у безпечний режим з автоматичним відключенням подачі мономеру.

Реалізація ПІД-регулювання в ПЛК

Контур температурного регулювання реалізовано на базі вбудованого ПІД-регулятора ПЛК.

Параметри налаштування:

- коефіцієнт підсилення;
- постійна інтегрування;
- постійна диференціювання.

Налаштування виконано методом:

- автонастройки;
- або Ziegler–Nichols.

SCADA-система керування

Вибір SCADA-платформи

Для диспетчеризації процесу обрано SCADA-систему типу:

- WinCC;
- iFIX;
- Ignition;
- Trace Mode.

Архітектура SCADA-системи

SCADA-система включає:

- сервер збору даних;
- клієнтські робочі місця;
- архіви даних.



Рисунок 2.3 Схема SCADA-системи керування

Опис SCADA-екранів

Головний екран

- апаратурно-технологічна схема;
- поточні значення параметрів;

- стан обладнання.

Екран трендів

- графіки температури;
- історія регулювання.

Екран аварій

- список подій;
- квітування сигналів.

Інформаційна безпека та надійність

Передбачено:

- резервування живлення;
- аварійне збереження даних;
- розмежування доступу користувачів.

Інтеграція з системами верхнього рівня

SCADA може бути інтегрована з:

- MES;
- ERP-системами;
- системами енергомоніторингу.

Розроблено програмно-технічну реалізацію автоматизованої системи керування процесом виробництва полівінілацетату. Запропонована структура АСУ ТП забезпечує стабільність технологічних параметрів, підвищення безпеки експлуатації та можливість подальшої модернізації системи.

3. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОБ'ЄКТУ КЕРУВАННЯ

3.1. Дослідження об'єкту керування

Мета та задачі математичного моделювання

Математичне моделювання процесу емульсійної полімеризації вінілового ацетату є необхідним етапом розробки автоматизованої системи керування, оскільки дозволяє дослідити динамічні властивості об'єкта, оцінити вплив керуючих та збурюючих дій, а також синтезувати ефективні алгоритми регулювання.

Основними задачами математичного моделювання є:

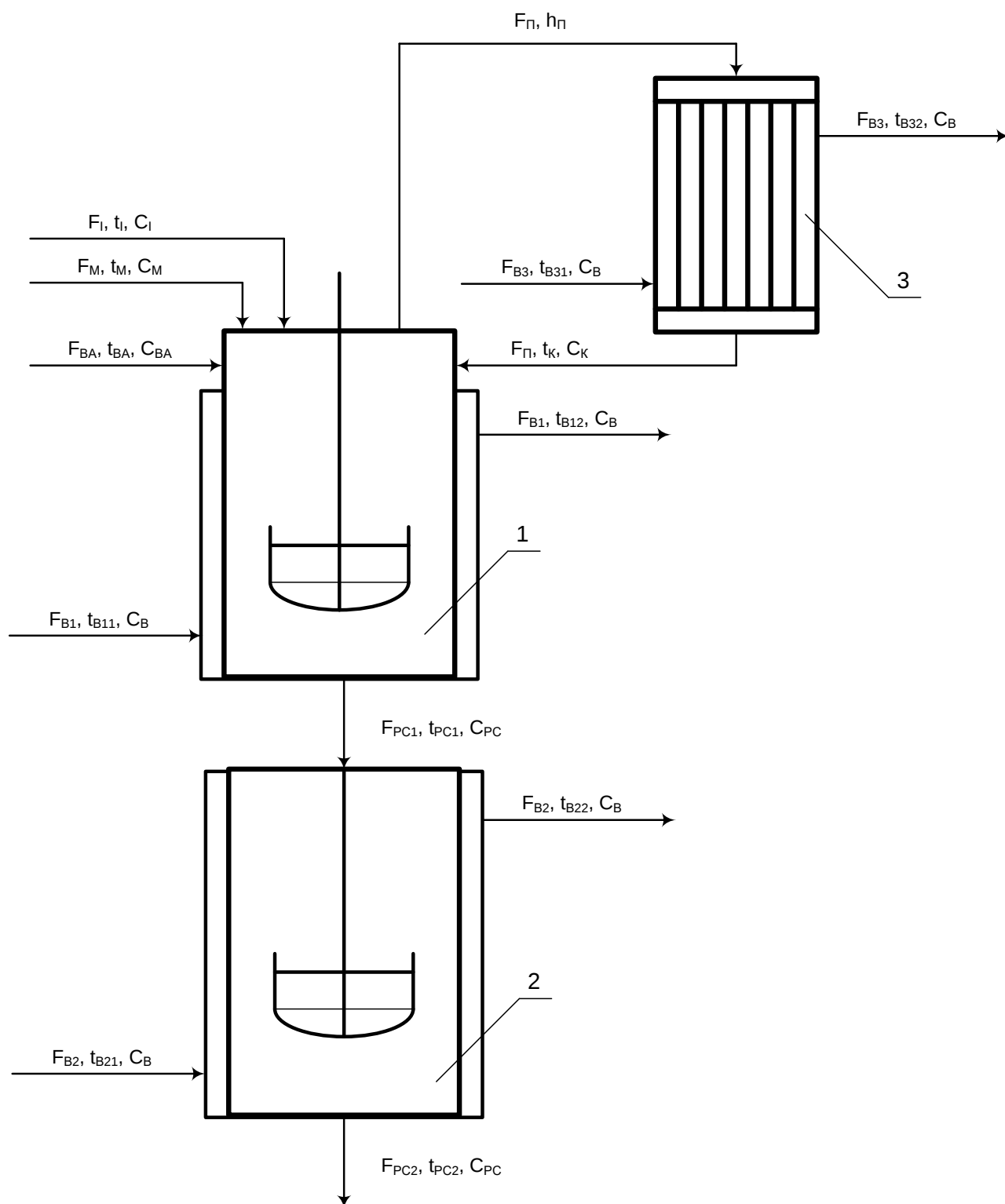
- опис матеріальних і теплових процесів у реакторі;
- отримання нелінійної динамічної моделі;
- лінеаризація моделі в околі робочої точки;
- визначення передатних функцій об'єкта керування;
- аналіз перехідних процесів.

Об'єкт моделювання та прийняті припущення

Об'єктом моделювання є реактор емульсійної полімеризації періодичної дії з мішалкою та теплообмінною рубашкою.

Для спрощення математичного опису прийнято такі припущення:

- реакційна маса є ідеально перемішаною;
- температура в усьому об'ємі реактора однакова;
- теплофізичні властивості середовища є сталими;
- втрати тепла в навколишнє середовище незначні;
- кінетика реакції описується узагальненою залежністю.



1 – перша ступінь реактора; 2 – друга ступінь реактора; 3 - зовнішній теплообмінник (холодильник)

Рисунок 3.1 – Розрахункова схема реактора-полімеризатора із зовнішнім теплообмінником

3.2. Матеріальний та тепловий баланс реактора

Розглянемо зміну концентрації мономеру у реакторі.

Матеріальний баланс для вінілового ацетату:

$$\frac{dC_M}{dt} = \frac{F_M}{V} (C_{M, \text{вх}} - C_M) - r_p$$

де

C_M — концентрація мономеру, кмоль/м³;

F_M — витрата мономеру, м³/с;

V — об'єм реактора, м³;

r_p — швидкість полімеризації.

Швидкість полімеризації описується виразом:

$$r_p = k_p C_M C_R$$

де k_p — константа швидкості реакції,

C_R — концентрація радикалів.

Процес полімеризації вінілового ацетату є екзотермічним, що обумовлює необхідність детального теплового аналізу.

Тепловий баланс реактора:

$$\rho C_p V \frac{dT}{dt} = Q_{\text{реакції}} - Q_{\text{охолодження}}$$

Тепловиділення реакції:

$$Q_{\text{реакції}} = (-\Delta H_r) \cdot r_p \cdot V$$

Відведення тепла через рубашку:

$$Q_{\text{охолодження}} = K A (T - T_{\text{ох}})$$

де

ρ — густина середовища;

C_p — теплоємність;

ΔH_r — теплота реакції;

K — коефіцієнт теплопередачі;

A — площа теплообміну;

$T_{\text{ох}}$ — температура охолоджувача.

Після підстановки:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{(-\Delta H_r) r_p}{\rho C_p} - \frac{K A}{\rho C_p V} (T - T_{\text{ох}})$$

Повна нелінійна математична модель процесу

Система рівнянь, що описує процес полімеризації:

$$\begin{cases} \frac{dC_M}{dt} = \frac{F_M}{V} (C_{M,\text{вх}} - C_M) - k_p C_M C_R \\ \frac{dT}{dt} = \frac{(-\Delta H_r) k_p C_M C_R}{\rho C_p} - \frac{K A}{\rho C_p V} (T - T_{\text{ох}}) \end{cases}$$

Отримана модель є нелінійною, багатопараметричною та інерційною.

Виражаємо з рівняння температуру t_{B12} :

$$t_{B12} = \frac{F_{B1} \cdot t_{B11} \cdot C_B + 0,8 \cdot \alpha_1 \cdot S_1 \cdot t_{PC1}}{0,8 \cdot \alpha_1 \cdot S_1 + F_{B1} \cdot C_B}$$

$$t_{PC1} = \frac{F_{BA} \cdot t_{BA} \cdot C_{BA} + F_M \cdot t_M \cdot C_M + F_I \cdot t_I \cdot C_I + F_{BA} \cdot q1 \cdot \left(\frac{F_{BA}}{F_M}\right) \cdot Kx - F_{II} \cdot i_{II} + F_{II} \cdot t_K \cdot C_K + \alpha_1 \cdot S_1 \cdot \frac{F_{B1} \cdot t_{B11} \cdot C_B}{0,8 \cdot \alpha_1 \cdot S_1 + F_{B1} \cdot C_B}}{F_{PC1} \cdot C_{PC} + \alpha_1 \cdot S_1 - \alpha_1 \cdot S_1 \frac{0,8 \cdot \alpha_1 \cdot S_1}{0,8 \cdot \alpha_1 \cdot S_1 + F_{B1} \cdot C_B}}$$

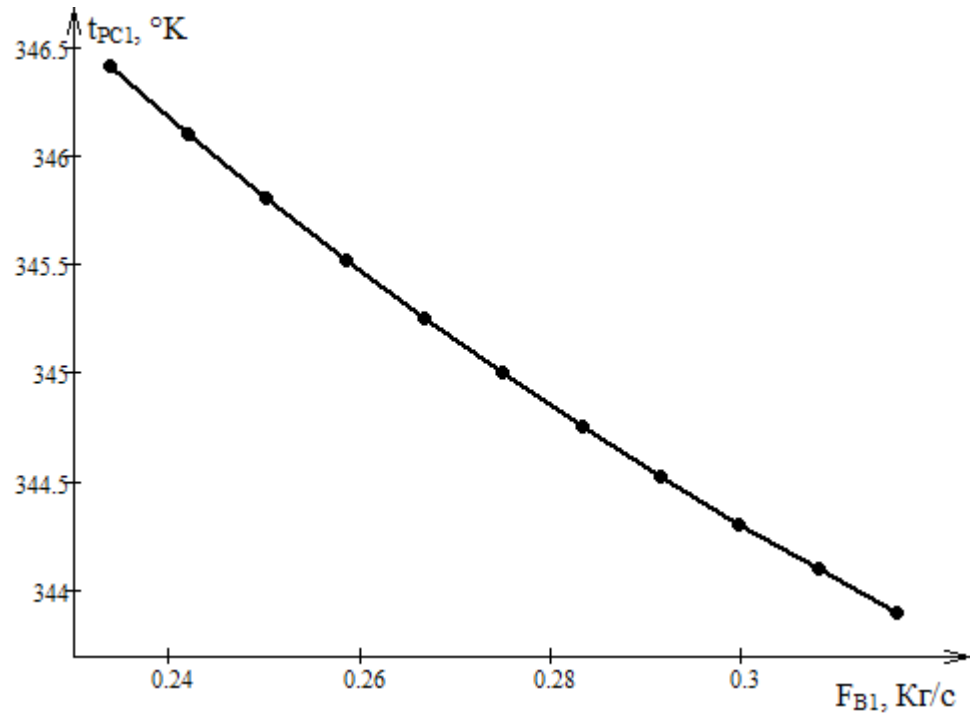


Рисунок 3.2 – Статична характеристика каналу $F_{B1} \rightarrow t_{PC1}$

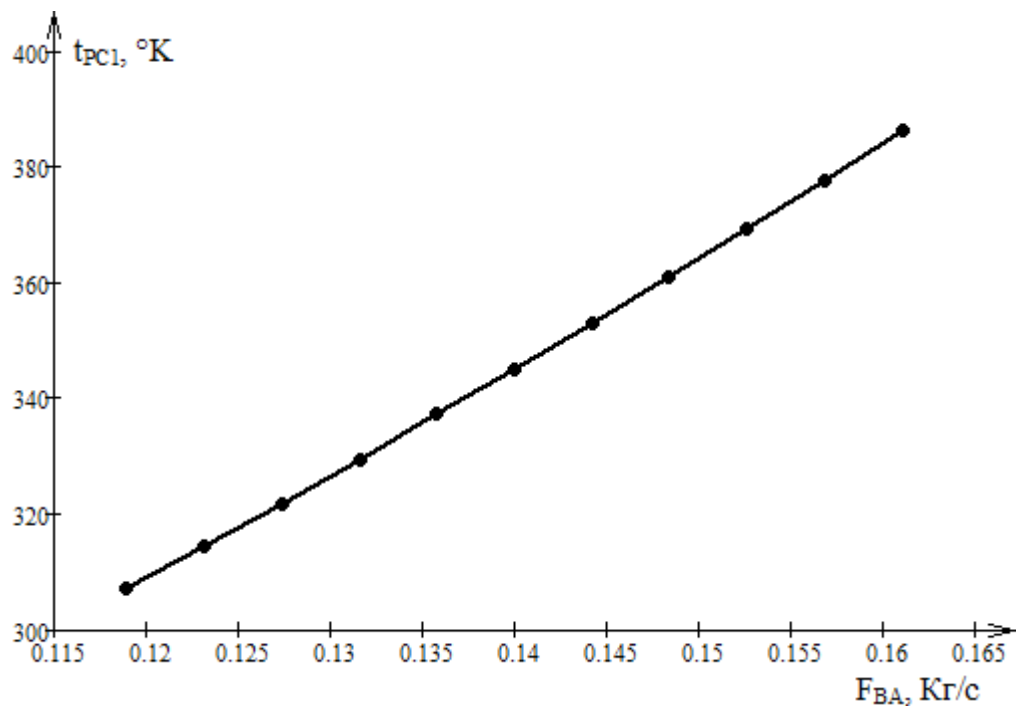


Рисунок 3.3 – Статична характеристика каналу $F_{BA} \rightarrow t_{PC1}$

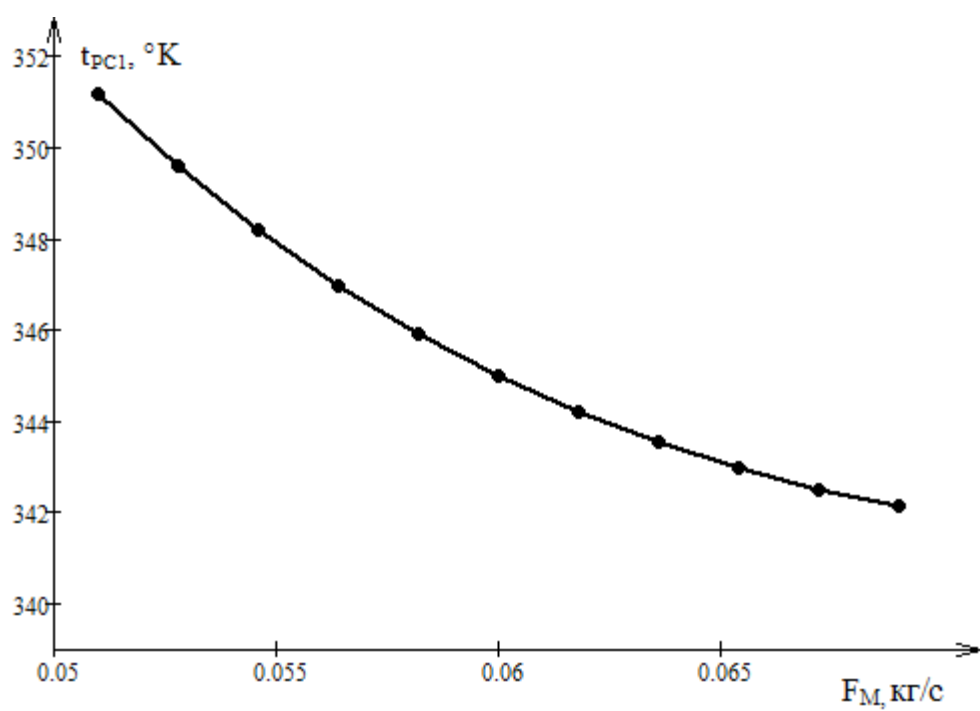


Рисунок 3.4 – Статична характеристика каналу $F_M \rightarrow t_{PCI}$

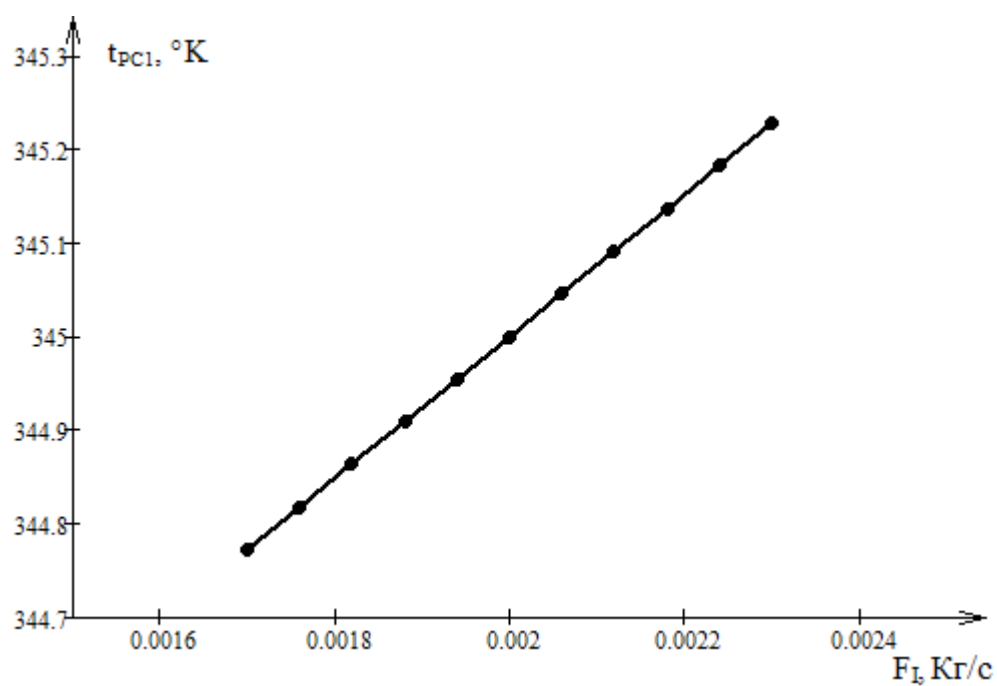


Рисунок 3.4 – Статична характеристика каналу $F_I \rightarrow t_{PCI}$

Вибір робочої точки та лінеаризація

Для синтезу системи автоматичного керування виконується лінеаризація моделі в околі номінального режиму роботи:

$$T = T_0 + \Delta T, \quad T_{\text{ох}} = T_{\text{ох}0} + \Delta T_{\text{ох}}$$

Після лінеаризації теплового рівняння:

$$\frac{d(\Delta T)}{dt} = -\frac{1}{T_0 \delta} \Delta T + K_{\text{о} \delta} \Delta T_{\text{ох}}$$

де

Тоб — постійна часу об'єкта;

Коб — коефіцієнт підсилення.

Передатна функція каналу керування

Переходячи до операторної форми:

$$W(s) = \frac{\Delta T(s)}{\Delta T_{\text{ох}}(s)} = \frac{K_{\text{о} \delta}}{T_0 \delta s + 1}$$

З урахуванням транспортного запізнення:

$$W(s) = \frac{K_{\text{о} \delta} e^{-\tau s}}{T_0 \delta s + 1}$$

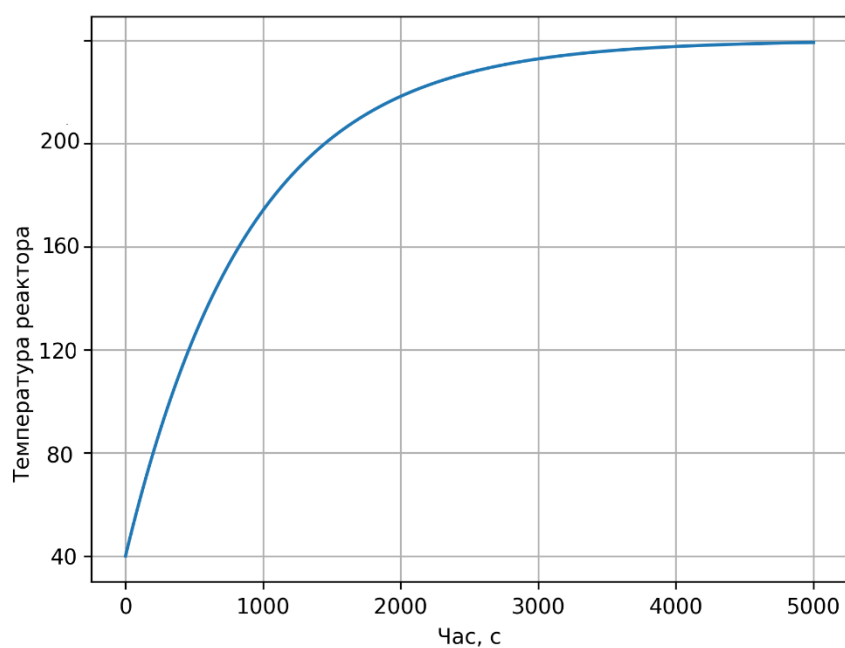


Рисунок 3.5 – Динамічна характеристика за каналом керування

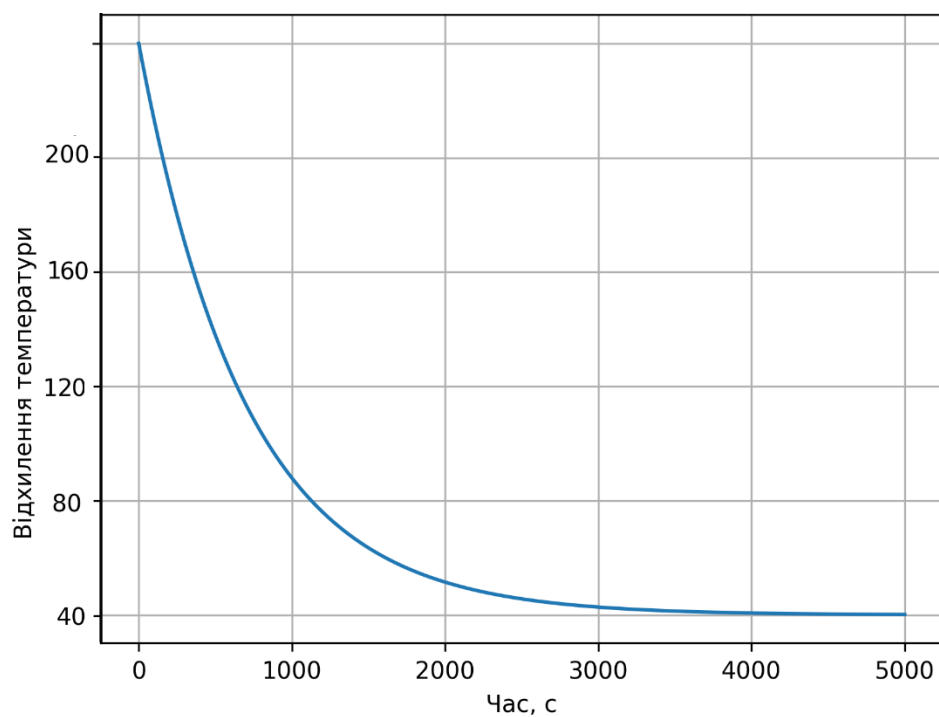


Рисунок 3.6 – Динамічна характеристика за каналом збурення

Ця модель відповідає аперіодичній ланці першого порядку з запізненням, що добре узгоджується з реальними властивостями реактора полімеризації.

Аналіз динамічних властивостей об'єкта

Для об'єкта характерні:

- велика постійна часу (десятки хвилин);
- значна теплова інерція;
- слабка саморегуляція;
- чутливість до збурень.

Це обґрунтовує використання:

- ПІД-регуляторів з інтегральною складовою;
- або МРС-регуляторів.

Перехідні процеси системи (опис)

При одиничному ступінчастому впливі температури охолоджувача спостерігається:

- плавне наростання температури реактора;
- відсутність коливань;

Розроблено математичну модель процесу емульсійної полімеризації полівінілацетату на основі матеріальних і теплових балансів. Отримано нелінійну модель реактора та лінеаризовано її в околі робочої точки. Визначено передатну функцію об'єкта керування, що дозволяє виконати синтез системи автоматичного керування та дослідити перехідні процеси, які підтверджують доцільність автоматизації температурного режиму реактора.

4. СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

4.1. Синтез системи керування з ПІД-регулятором

Синтез систем автоматичного керування — це процес, в якому досліджується система, теоретично й практично розвивається, а в подальшому реалізується реалізація динамічних властивостей систем керування процесами для виконання певних завдань за основними критеріями оптимальності.

Оцінити властивості системи можна на основі форми її перехідних властивостей [8]. Під час синтезу необхідно виконати кілька кроків.

Першим кроком є визначення оптимальних властивостей системи. Тут ми розглядаємо можливості та те, як він повинен поводитися з урахуванням обмежень, які він вводить.

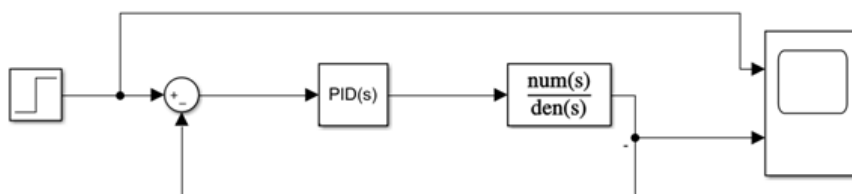


Рисунок 4.1 Структура системи керування реактором із ПІД-регулятором

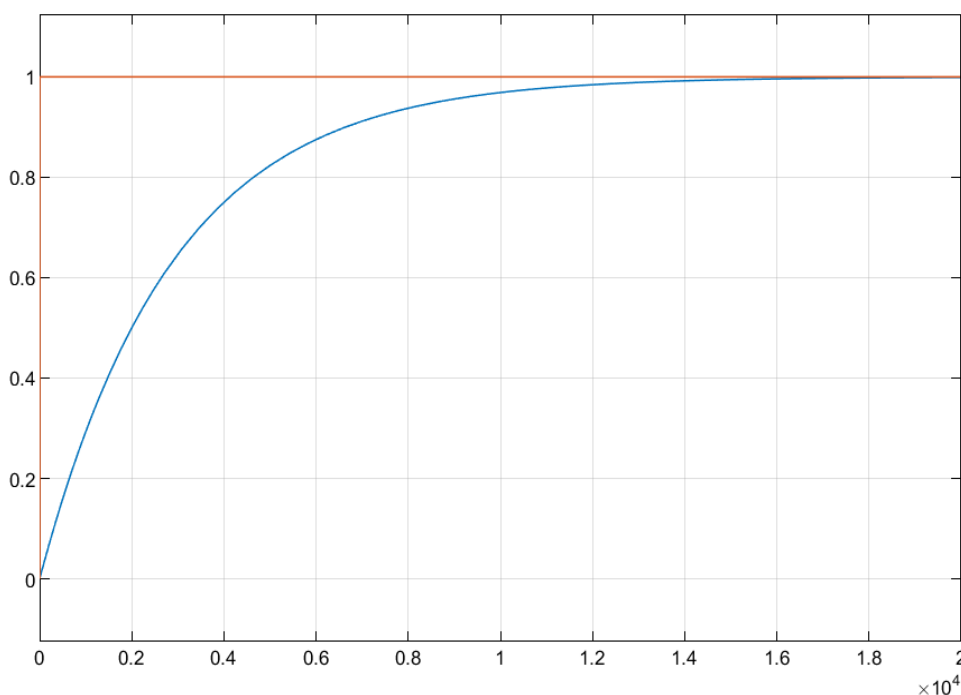


Рисунок 4.2 Перехідна характеристика системи за каналом керування

4.2. Алгоритм функціонування програмної імітаційної моделі реактора

Реалізовано у комп'ютерно-мікропроцесорному навчальному середовищі із системи з приладів МІКРОЛ

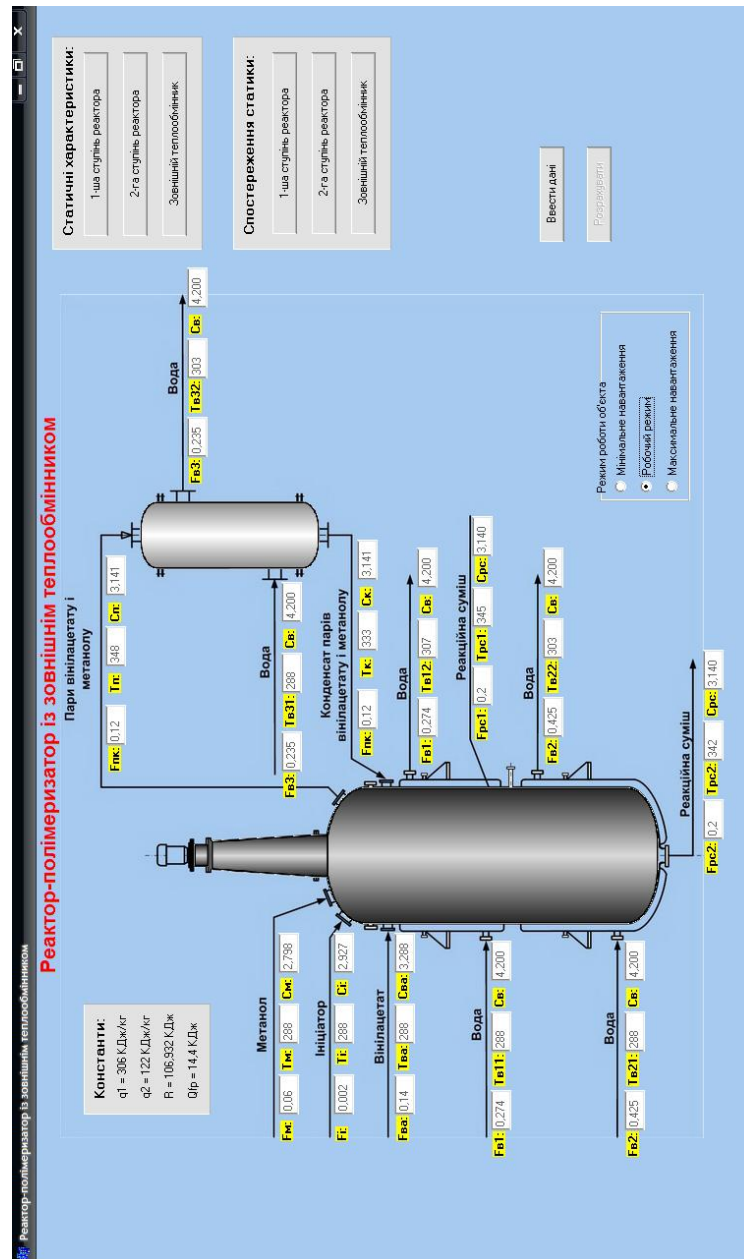


Рисунок 4.3 – Вікно програмного імітатора реактора

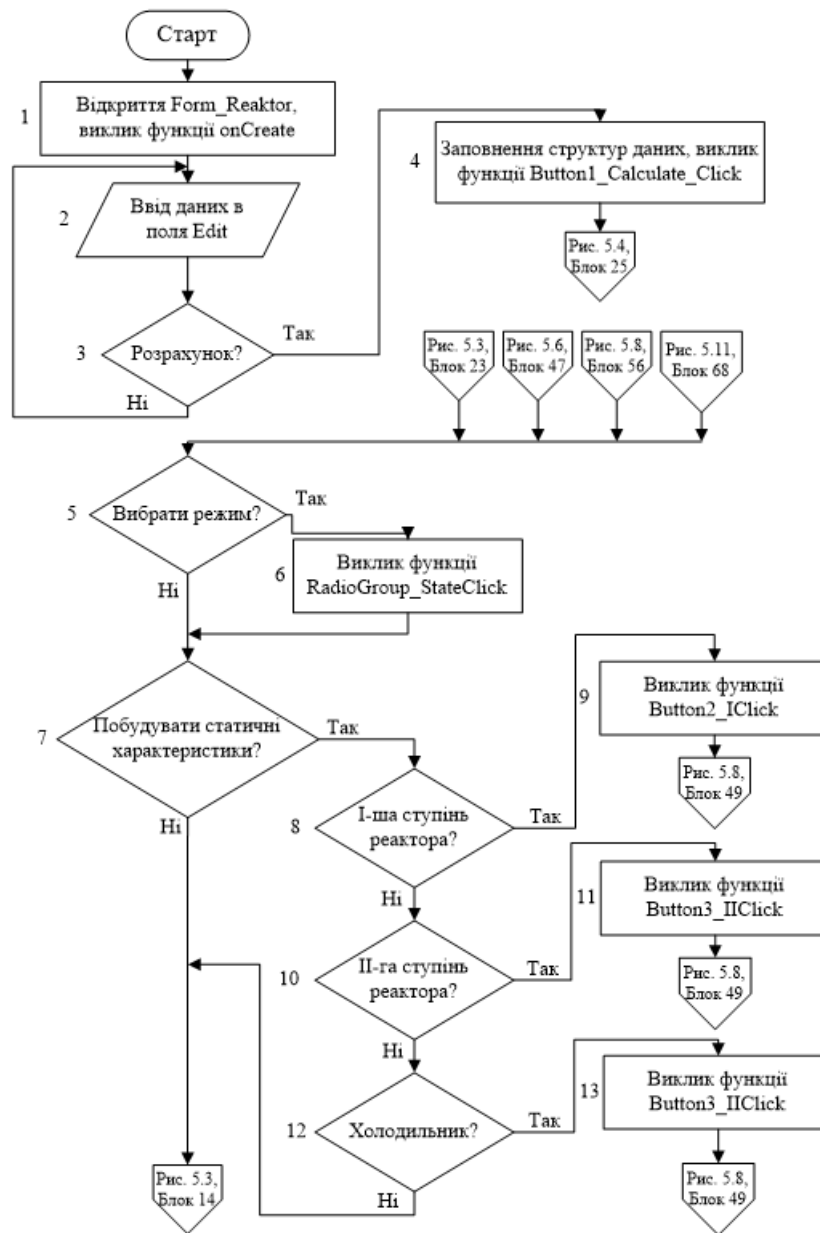


Рисунок 4.4 – Блок-схема загального алгоритму функціонування програмної імітаційної моделі

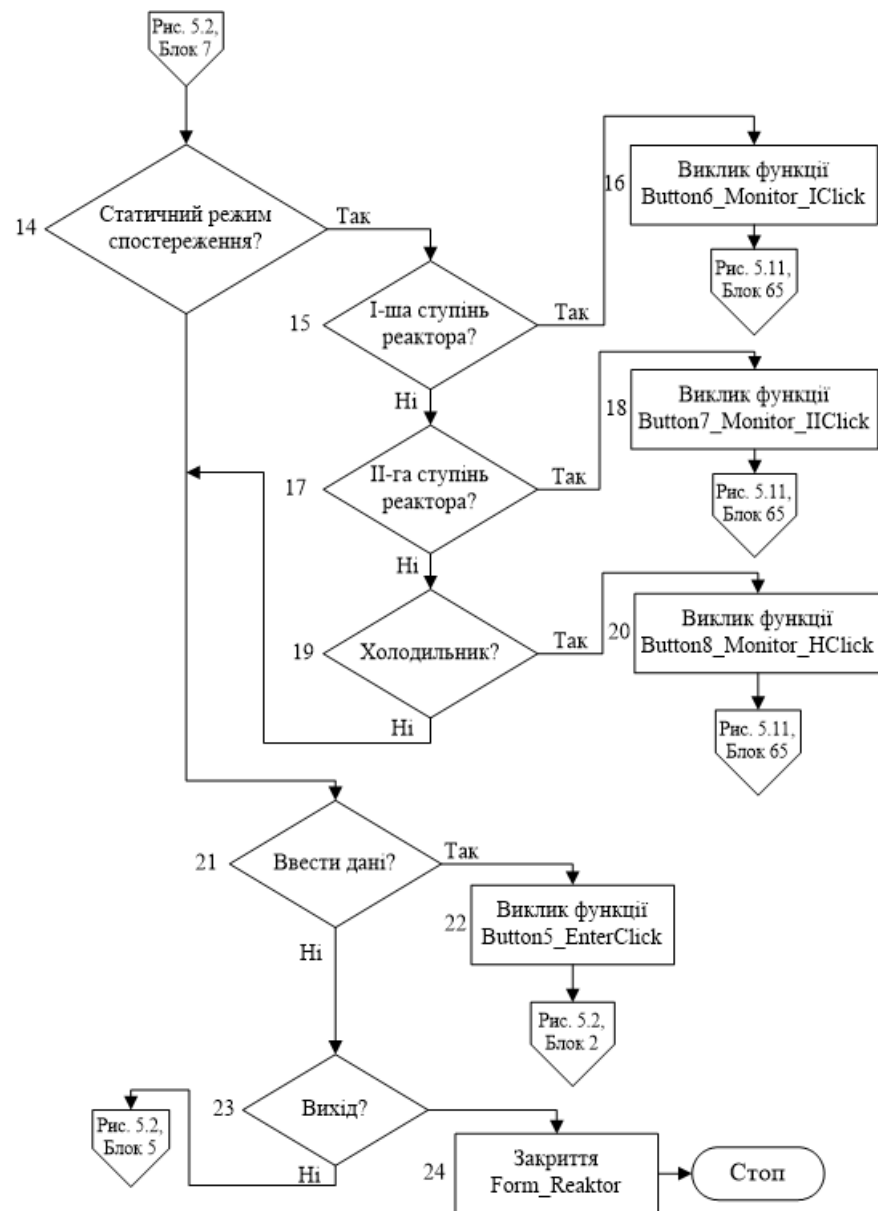


Рисунок 4.4 – Блок-схема загального алгоритму функціонування програмної імітаційної моделі (продовження)

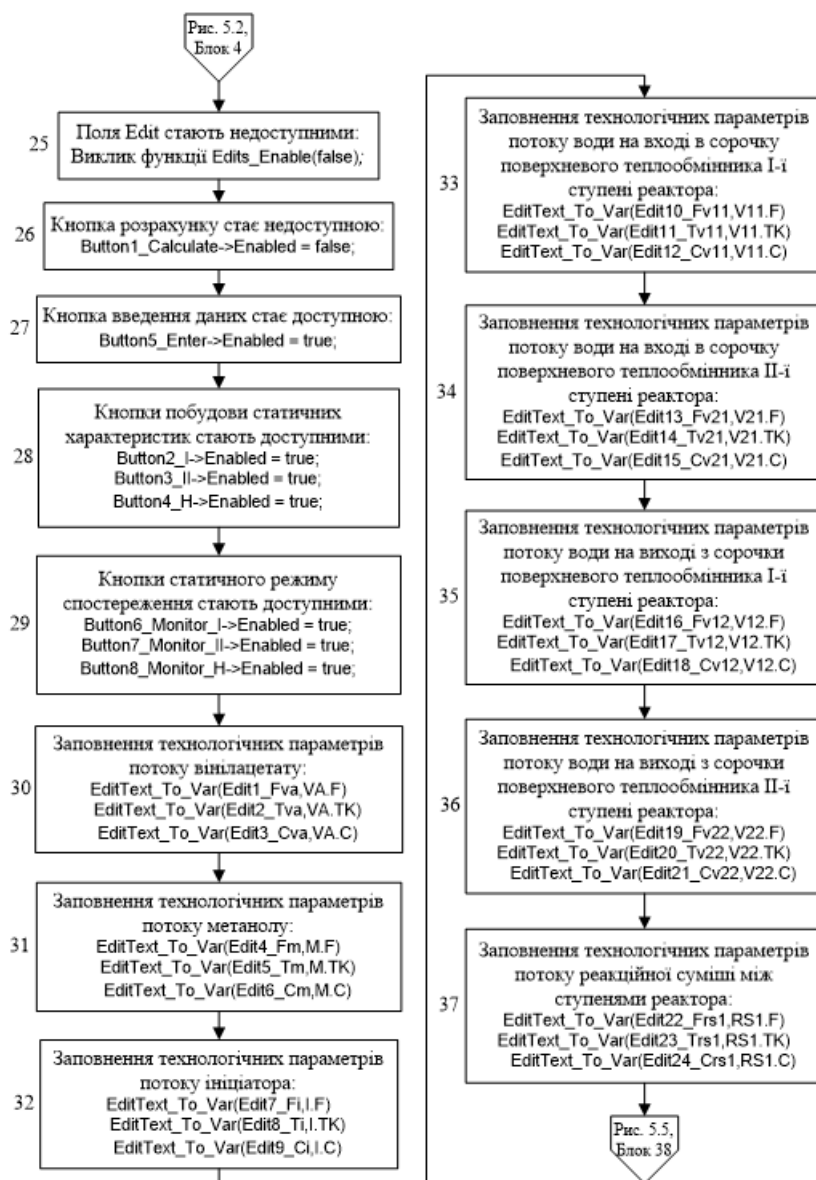


Рисунок 4.5 – Блок-схема алгоритму формування структур даних технологічних параметрів до імітаційної моделі

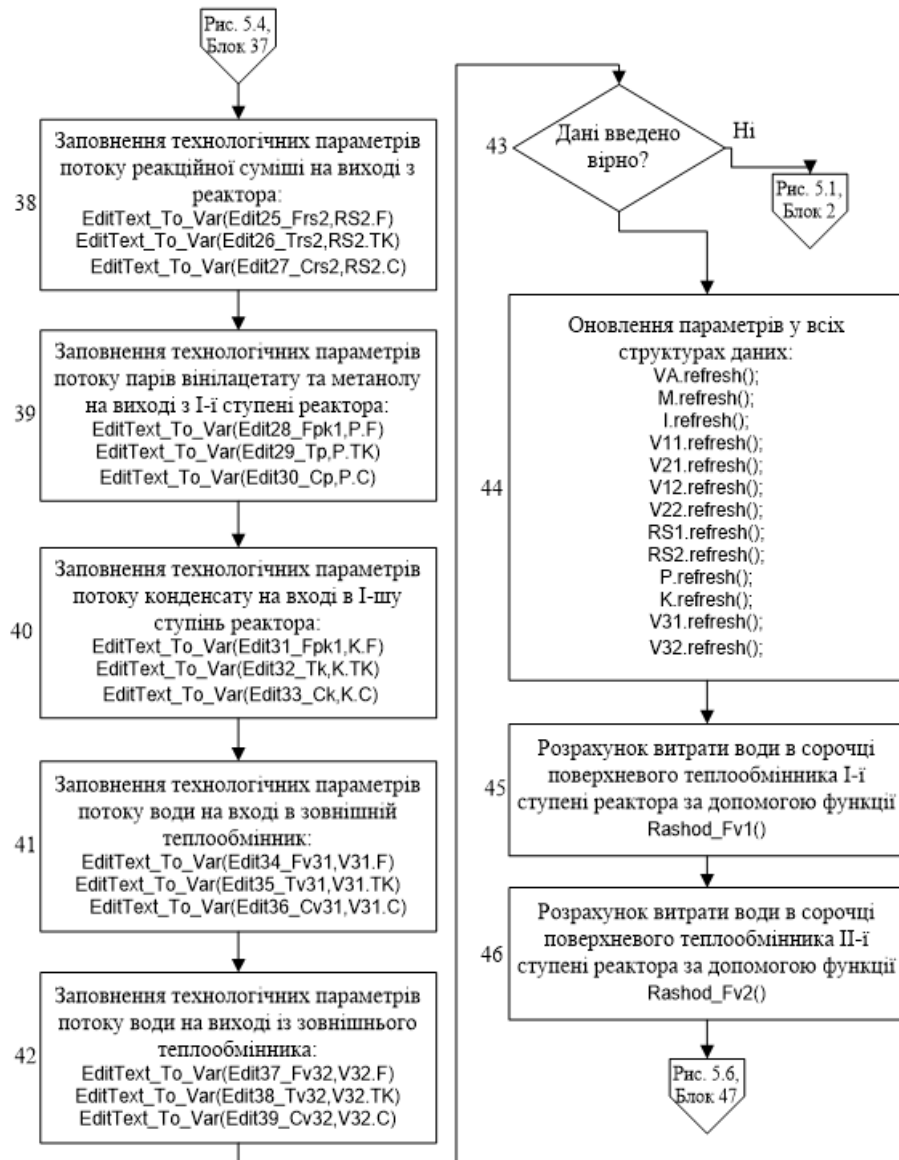


Рисунок 4.6 – Блок-схема алгоритму формування структур даних технологічних параметрів до імітаційної моделі (продовження)

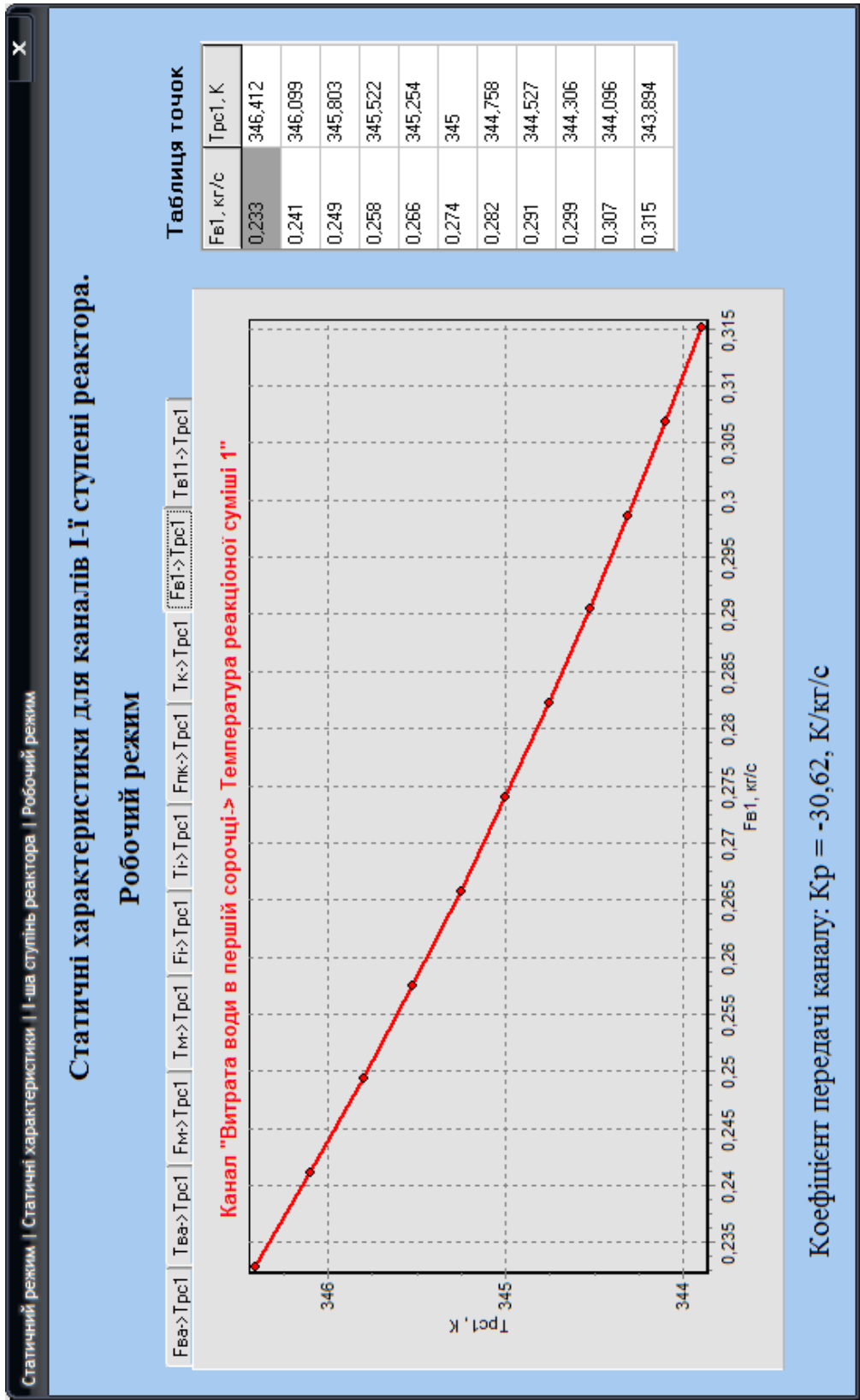


Рисунок 4.7 – Вікно програмного імітатора для побудови статичних характеристик реактора

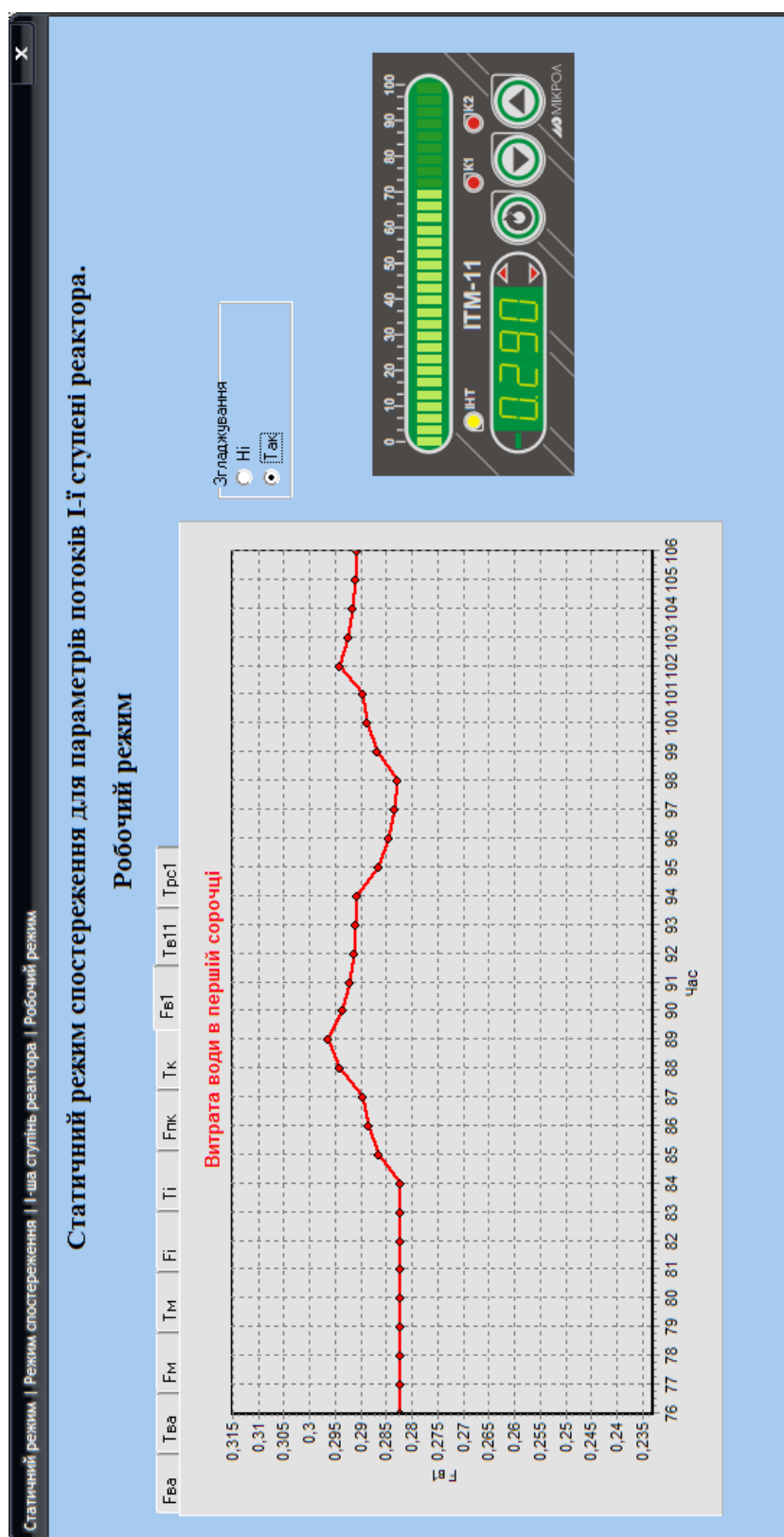


Рисунок 4.8 – Вікно програмного імітатора для спостереження статичного режиму реактора

5. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

5.1. Поняття стартап-проєкту

Стартап-проєкт присвячений розробці та впровадженню автоматизованої системи керування технологічним процесом виробництва полівінілацетату (ПВА) — одного з найбільш поширених полімерів, що використовується у виробництві клеїв, лакофарбових матеріалів, будівельних сумішей та продукції деревообробної промисловості.

Метою проєкту є створення конкурентоспроможного виробництва з високим рівнем автоматизації, що забезпечує стабільну якість продукції, зниження собівартості та відповідність сучасним екологічним вимогам. Реалізація стартапу базується на впровадженні PLC-контролерів, SCADA-систем, сучасних датчиків та алгоритмів оптимального керування.

Проєкт орієнтований на промислових споживачів (B2B) та має значний економічний потенціал завдяки зростанню попиту на водно-дисперсійні полімери та імпортозаміщенню. Очікуваний термін окупності інвестицій становить 2–4 роки.

АКТУАЛЬНІСТЬ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЄКТУ

Сучасна хімічна промисловість характеризується високою конкуренцією, зростанням вартості сировини та енергоносіїв, а також посиленням вимог до екологічної безпеки. В умовах таких викликів автоматизація технологічних процесів стає ключовим фактором підвищення ефективності виробництва.

Процес виробництва полівінілацетату є складним, багатопараметричним та чутливим до змін технологічних режимів. Недостатній контроль температури, швидкості полімеризації або концентрації реагентів призводить до:

- нестабільної якості продукції;
- перевитрат сировини;
- підвищеного енергоспоживання;
- зростання кількості браку.

Для України актуальність проєкту також обумовлена високою залежністю від імпорту полімерної продукції та необхідністю модернізації існуючих виробництв.

МЕТА, ЗАВДАННЯ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ПРОЄКТУ

Мета проєкту

Розробка та економічне обґрунтування стартап-проєкту автоматизації виробництва полівінілацетату з метою підвищення ефективності та конкурентоспроможності підприємства.

Завдання проєкту:

- проаналізувати ринок ПВА;
- дослідити технологічний процес виробництва;
- розробити структуру автоматизованої системи керування;
- оцінити економічну ефективність автоматизації;
- сформувати бізнес-модель стартапу.

Об'єкт проєкту

Технологічний процес виробництва полівінілацетату.

Предмет проєкту

Методи та засоби автоматизації виробничого процесу ПВА.

5.2. Загальні підходи до економічного обґрунтування

АНАЛІЗ РИНКУ ПОЛІВІНІЛАЦЕТАТУ

Світовий ринок

Світовий ринок полівінілацетату демонструє стабільне зростання, зумовлене розвитком будівельної галузі, меблевого виробництва та пакувальної індустрії. Основними споживачами ПВА є виробники клеїв, адгезивів та лакофарбових матеріалів.

Середній темп зростання ринку становить 4–6 % на рік, що робить даний сегмент привабливим для інвестицій.

Ринок України

В Україні значна частина полівінілацетату імпортується, що призводить до підвищення вартості кінцевої продукції. Розвиток локального автоматизованого виробництва дозволяє знизити імпортозалежність та забезпечити стабільні поставки.

АНАЛІЗ КОНКУРЕНТНОГО СЕРЕДОВИЩА

Основними конкурентами є:

- великі міжнародні хімічні концерни;
- регіональні виробники полімерів;
- постачальники альтернативних клеїв.

Конкурентною перевагою стартапу є:

- автоматизоване виробництво;
- стабільна якість продукції;

- гнучкість під вимоги замовника;
- нижча собівартість.

ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ПОЛІВІНІЛАЦЕТАТУ

Полівінілацетат отримують методом емульсійної радикальної полімеризації вінілацетату у водному середовищі з використанням ініціаторів, емульгаторів та стабілізаторів. Обраний метод є найбільш поширеним у промисловості завдяки високій продуктивності, екологічності та можливості отримання полімеру з заданими фізико-хімічними властивостями.

Характеристика сировини

Основною сировиною для виробництва ПВА є:

- вінілацетатний мономер;
- вода демінералізована;
- емульгатори (полівініловий спирт, ПАР);
- ініціатори полімеризації (персульфати);
- регулятори молекулярної маси;
- стабілізатори рН.

Якість сировини безпосередньо впливає на ступінь полімеризації, в'язкість дисперсії та стабільність готового продукту.

Основні стадії технологічного процесу

Підготовка

сировини.

На даному етапі здійснюється дозування компонентів, контроль концентрацій та підготовка водної фази. Порушення співвідношення компонентів призводить до нестабільної полімерної структури.

Емульсійна полімеризація.
Процес відбувається у реакторі з мішалкою при температурі 60–90 °С.
Полімеризація є екзотермічною, що вимагає точного контролю температури.

Стабілізація та дозрівання.
Після завершення полімеризації здійснюється стабілізація дисперсії для досягнення необхідної в'язкості та однорідності.

Охолодження та зберігання.
Готовий продукт охолоджується та направляється у ємності зберігання.

АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ ТРАДИЦІЙНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ

При відсутності сучасних автоматизованих систем керування процес виробництва ПВА характеризується низкою проблем:

- ручне регулювання температури з великими запізненнями;
- нерівномірна подача мономеру;
- неможливість оперативного прогнозування аварійних ситуацій;
- залежність якості продукції від кваліфікації оператора.

Коливання температури полімеризації на $\pm 2-3$ °С можуть призводити до різкого зростання в'язкості або неповної полімеризації, що негативно впливає на якість клеїв.

ОБҐРУНТУВАННЯ НЕОБХІДНОСТІ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Автоматизація технологічного процесу є ключовою умовою стабільного та економічно ефективного виробництва ПВА.

Основні цілі автоматизації:

- забезпечення стабільного теплового режиму реактора;
- автоматичне дозування компонентів;
- зменшення людського фактору;
- підвищення безпеки виробництва.

Автоматизоване керування дозволяє підтримувати параметри процесу в оптимальних межах та зменшити втрати сировини до 5–7 %.

СТРУКТУРА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

Запропонована автоматизована система керування (АСК) має ієрархічну структуру та включає три рівні.

Нижній рівень

- датчики температури, тиску, рівня;
- витратоміри;
- аналізатори рН;
- виконавчі механізми (клапани, насоси, мішалки).

Середній рівень

Програмовані логічні контролери (PLC), які виконують:

- обробку сигналів;
- реалізацію алгоритмів ПД-регулювання;
- логіку безпеки.

Верхній рівень

SCADA-система для візуалізації, архівації та аналізу даних.

SCADA-СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ВИРОБНИЦТВОМ ПВА

SCADA-система є центральним елементом диспетчерського керування та забезпечує:

- відображення технологічних схем у реальному часі;
- сигналізацію відхилень параметрів;
- ведення архівів;
- формування змінних та місячних звітів.

Інтерфейс оператора реалізується з урахуванням ергономічних вимог та принципів НМІ.

АЛГОРИТМИ АВТОМАТИЧНОГО ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ

Для забезпечення оптимальної роботи реактора застосовуються комбіновані алгоритми керування.

ПІД-регулювання використовується для підтримання температури та рівня.

Модельно-прогнозне керування (МРС) дозволяє:

- враховувати запізнення процесу;
- мінімізувати коливання температури;
- оптимізувати подачу теплоносія.

Використання МРС знижує коливання температури до $\pm 0,5$ °С.

ОЦІНКА КАПІТАЛЬНИХ ВИТРАТ (CAPEX)

Капітальні витрати включають:

- реакторне обладнання;

- системи автоматизації;
- SCADA-програмне забезпечення;
- монтажні та пусконаладжувальні роботи.

Частка автоматизації у загальних інвестиціях становить 15–25 %, але забезпечує значний економічний ефект.

ОПЕРАЦІЙНІ ВИТРАТИ ТА ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ

Структура операційних витрат

- сировина;
- енергоносії;
- обслуговування обладнання;
- персонал.

Економічний ефект автоматизації

Впровадження АСК забезпечує:

- зниження енергоспоживання на 10–15 %;
- скорочення браку на 20–30 %;
- зменшення витрат на персонал.

Очікуваний термін окупності проєкту становить 2–3 роки, що підтверджує його економічну доцільність.

БІЗНЕС-МОДЕЛЬ СТАРТАПУ

Стартап-проєкт автоматизації процесу виробництва полівінілацетату функціонує у форматі B2B (Business-to-Business) та орієнтований на промислових споживачів хімічної та суміжних галузей. Основною цінністю проєкту є підвищення

ефективності, стабільності якості продукції та зниження виробничих витрат шляхом впровадження сучасних автоматизованих систем керування.

Ключовими споживачами продукції та технологічних рішень стартапу є:

- підприємства з виробництва клеїв та адгезивів;
- будівельні компанії;
- виробники лакофарбових матеріалів;
- деревообробні та меблеві підприємства;
- підприємства паперової та пакувальної промисловості.

Бізнес-модель стартапу базується на вертикальній інтеграції, що включає:

- власне виробництво полівінілацетату;
- впровадження автоматизованих систем керування;
- сервісну підтримку та оптимізацію виробничих процесів.

Основними джерелами доходу є:

- продаж готової продукції (полівінілацетатні дисперсії);
- укладання довгострокових контрактів на постачання ПВА;
- надання інжинірингових та сервісних послуг з автоматизації;
- ліцензування програмно-технічних рішень.

Витратна частина бізнес-моделі включає капітальні інвестиції у виробниче обладнання, автоматизацію, програмне забезпечення, а також операційні витрати на енергоносії, сировину та персонал. Завдяки автоматизації забезпечується зниження собівартості продукції та підвищення рентабельності виробництва.

МАРКЕТИНГОВА СТРАТЕГІЯ

Маркетингова стратегія стартапу спрямована на формування стабільних довгострокових відносин з промисловими споживачами та просування автоматизованого виробництва як конкурентної переваги.

Основними інструментами маркетингової стратегії є:

Прямі контракти

Продаж продукції здійснюється переважно через укладання прямих контрактів із корпоративними клієнтами. Такий підхід дозволяє:

- забезпечити стабільні обсяги збуту;
- мінімізувати логістичні витрати;
- адаптувати технічні характеристики продукту під вимоги замовника.

Галузеві виставки та конференції

Участь у спеціалізованих хімічних та будівельних виставках дозволяє:

- презентувати технологічні переваги автоматизованого виробництва;
- залучати нових клієнтів;
- встановлювати партнерські відносини з постачальниками сировини та обладнання.

Партнерства з виробниками клеїв

Стратегічне партнерство з виробниками клеїв та адгезивів забезпечує:

- стабільний попит на продукцію;
- спільну розробку нових рецептур;
- довгострокове планування виробничих потужностей.

SWOT-АНАЛІЗ

Для оцінки конкурентоспроможності стартап-проєкту проведено SWOT-аналіз.

Сильні сторони (Strengths):

- високий рівень автоматизації виробництва;
- стабільна якість полівінілацетату;
- зниження виробничих витрат;
- відповідність екологічним стандартам.

Слабкі сторони (Weaknesses):

- значні початкові інвестиції;
- залежність від цін на сировину;
- потреба у висококваліфікованому персоналі.

Можливості (Opportunities):

- зростання попиту на екологічні клеї;
- імпортозаміщення;
- вихід на ринки ЄС;
- масштабування виробництва.

Загрози (Threats):

- коливання світових цін на нафтохімічну сировину;
- конкуренція з боку великих міжнародних компаній;
- технологічні ризики впровадження нових систем.

АНАЛІЗ РИЗИКІВ

Реалізація стартап-проекту супроводжується низкою ризиків, які умовно поділяються на цінові, технологічні та ринкові.

Цінові ризики пов'язані з нестабільністю вартості винилацетату та енергоресурсів. Їх мінімізація досягається шляхом довгострокових контрактів із постачальниками та оптимізації енергоспоживання.

Технологічні ризики виникають під час впровадження автоматизованих систем керування та можуть призвести до збоїв у виробництві. Зниження цих ризиків забезпечується резервуванням обладнання та поетапним введенням автоматизації.

Ринкові ризики пов'язані зі змінами попиту та конкуренцією. Їх зменшення досягається диверсифікацією клієнтської бази та гнучкою ціновою політикою.

ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ

Проект автоматизації виробництва полівінілацетату відповідає принципам сталого розвитку та екологічної безпеки. Використання водно-дисперсійних полімерів забезпечує зниження викидів летких органічних сполук.

Автоматизація дозволяє:

- мінімізувати втрати сировини;
- зменшити споживання енергії;
- забезпечити контроль викидів та стічних вод;
- підвищити рівень промислової безпеки.

КАДРОВЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Для реалізації стартап-проекту необхідне формування команди, що включає:

- технологів хімічного виробництва;
- інженерів-автоматиків;
- операторів автоматизованих ліній;
- фахівців з IT та обслуговування SCADA-систем;
- менеджерів з продажу та логістики.

Підвищення кваліфікації персоналу здійснюється шляхом спеціалізованих тренінгів та навчання роботі з автоматизованими системами керування.

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ПРОЄКТУ

Перспективи розвитку стартап-проєкту включають:

- розширення виробничих потужностей;
- впровадження цифрових двійників;
- інтеграцію з ERP-системами;
- вихід на міжнародні ринки;
- розробку нових видів полімерних дисперсій.

Реалізація стартап-проєкту з автоматизації виробництва полівінілацетату є економічно доцільною та технологічно обґрунтованою. Впровадження сучасних систем керування забезпечує підвищення ефективності виробництва, стабільність якості продукції та зниження витрат, що створює передумови для сталого розвитку підприємства та підвищення його конкурентоспроможності.

5.3. Структура споживання та сегменти ринку

Вихідні дані для розрахунку

Характеристика виробництва

- Тип продукції: полівінілацетатна дисперсія

- Потужність: 10 000 т/рік
- Режим роботи: 330 діб/рік
- Ціна реалізації ПВА: 1 200 €/т
- Курс умовно: 1 € = 40 грн

Річний дохід

D=120000000€

КАПІТАЛЬНІ ВИТРАТИ (CAPEX)

Стаття	Вартість, €
Реакторне обладнання	1 200 000
Теплообмінники, насоси	400 000
PLC (Siemens / Schneider)	180 000
Датчики, КВПіА	220 000
SCADA + сервер	150 000
Монтаж і ПНР	250 000
Навчання персоналу	50 000
Разом CAPEX	2 450 000 €

ОПЕРАЦІЙНІ ВИТРАТИ ДО АВТОМАТИЗАЦІЇ (ОРЕХ_o)

Стаття	€/рік
Сировина	6 500 000
Енергія	1 200 000
Персонал	900 000
Ремонт і обслуговування	600 000

Стаття	€/рік
Втрати від браку	500 000
Разом ОРЕХ ₀	9 700 000 €

ОРЕХ ПІСЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ (ОРЕХ₁)

Ефект автоматизації:

- ↓ енергія: –12 %
- ↓ персонал: –20 %
- ↓ брак: –30 %
- ↓ ремонт: –10 %

Стаття	€/рік
Сировина	6 500 000
Енергія	1 056 000
Персонал	720 000
Ремонт	540 000
Втрати від браку	350 000
Разом ОРЕХ ₁	9 166 000 €

РІЧНА ЕКОНОМІЯ 534000€

ДОДАТКОВИЙ ПРИБУТОК ВІД ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ

Завдяки стабільній якості:

- ↑ ціна на +3 %

$\Delta D = 360000 \text{ €}$

ЗАГАЛЬНИЙ РІЧНИЙ ЕФЕКТ

$$\text{Ерічний} = 534\,000 + 360\,000 = 894\,000 \text{€}$$

ГРОШОВИЙ ПОТІК (CASH FLOW)

Рік CF, €

0 -2 450 000

1 894 000

2 894 000

3 894 000

4 894 000

5 894 000

ТЕРМІН ОКУПНОСТІ (Payback Period)

T=2.74 роки

Окупність $\approx$ 2 роки 9 місяців

РОЗРАХУНОК NPV

Дисконтна ставка:

$$r \approx +7700000 \text{€}$$

NPV > 0 → проєкт економічно доцільний

ВНУТРІШНЯ НОРМА ДОХІДНОСТІ (IRR)

$$\text{IRR} \approx 26\text{--}28\% \quad \text{IRR} \approx 26\text{--}28\%$$

→ $IRR > r$ → інвестиційно привабливий

ІНДЕКС ПРИБУТКОВОСТІ (PI)

$$PI = 1.31$$

$PI > 1$ → проєкт ефективний

Виконані розрахунки показують, що впровадження автоматизованої системи керування виробництвом полівінілацетату є економічно доцільним. Проєкт характеризується позитивним значенням чистої приведеної вартості, високою внутрішньою нормою доходності та коротким терміном окупності. Автоматизація забезпечує зниження операційних витрат, підвищення якості продукції та створює передумови для сталого розвитку підприємства.

ВИСНОВОК

У магістерській дисертації розглянуто та комплексно вирішено науково-практичне завдання підвищення ефективності процесу виробництва полівінілацетату шляхом впровадження сучасних засобів автоматизації, математичного моделювання та автоматичного керування основними технологічними параметрами.

У ході виконання роботи було проведено детальний аналіз технологічного процесу емульсійної полімеризації вінілацетату, визначено його особливості як складного багатопараметричного, нелінійного та тепловиділяючого об'єкта керування. Показано, що ключовим параметром, який визначає якість готового полівінілацетату, є температурний режим реактора, оскільки від нього залежать швидкість полімеризації, молекулярна маса полімеру, ступінь конверсії мономеру та стабільність процесу.

На основі аналізу фізико-хімічних закономірностей процесу синтезу ПВА сформовано математичну модель реактора полімеризації у вигляді системи диференціальних рівнянь матеріального та теплового балансів. Отримана модель адекватно відображає динаміку температури, тепловиділення реакції та вплив збурень, що дало змогу виконати лінеаризацію об'єкта керування та представити його у вигляді передатних функцій для подальшого синтезу систем автоматичного регулювання.

Проведене моделювання перехідних процесів показало, що робота реактора без автоматичного регулювання характеризується значною інерційністю, великим часом встановлення та високою чутливістю до зовнішніх збурень. Це підтверджує неможливість забезпечення стабільної якості полівінілацетату виключно за рахунок ручного керування та обґрунтовує необхідність впровадження автоматизованої системи керування.

У роботі синтезовано систему автоматичного регулювання температури реактора на базі ПІД-регулятора. За результатами комп'ютерного моделювання встановлено, що застосування ПІД-регулювання забезпечує суттєве покращення динамічних характеристик системи, зменшення часу перехідного процесу, ліквідацію статичної похибки та зниження впливу збурень. Отримані перехідні характеристики підтверджують стійкість та ефективність запропонованого алгоритму керування.

Розроблено програмно-технічну реалізацію системи автоматизації виробництва полівінілацетату із застосуванням сучасних промислових контролерів, датчиків та виконавчих механізмів. Сформовано функціональну схему автоматизації, структурну схему системи керування, а також SCADA-систему з повноцінною візуалізацією технологічного процесу, архівацією параметрів, сигналізацією аварійних режимів та можливістю операторського втручання.

У межах роботи розроблено програмне забезпечення ПЛК з використанням мов стандарту IEC 61131-3 (Structured Text та Function Block Diagram), що забезпечує надійне та гнучке керування процесом полімеризації в умовах промислової експлуатації.

Впровадження запропонованої автоматизованої системи керування дозволяє:

- підвищити стабільність температурного режиму реактора;
- забезпечити стабільну якість готового полівінілацетату;
- знизити втрати сировини та енергоносіїв;
- підвищити рівень промислової безпеки;
- скоротити вплив людського фактора на процес керування.

Отримані результати мають практичну цінність і можуть бути використані при проєктуванні нових або модернізації існуючих виробництв полівінілацетату, а також у навчальному процесі при підготовці фахівців з автоматизації та хімічної технології.

Загалом поставлена у магістерській дисертації мета досягнута, а всі сформульовані завдання виконані в повному обсязі. Запропоновані технічні та програмні рішення є обґрунтованими, ефективними та відповідають сучасному рівню розвитку систем автоматизації хіміко-технологічних процесів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Гетьманчук Ю.П., Братичак М.М., Хімія та технологія полімерів. Підручник. – Львів. Видавництво «Бескид Біт», 2006. – 496 с.
2. Лукінюк М. В., Автоматизація типових технологічних процесів: технологічні об'єкти керування та схеми автоматизації: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл., які навчаються за напрямом «Автоматизація і комп'ют.-інтегр. технології» – К.: НТУУ «КПІ», 2008. – 236 с.
3. Одінцов В. П. Хімічна технологія полімерів : підручник. – Київ : Вища школа, 2012. – 412 с.
4. Кулезньов В. Н., Шершнєв В. А. Хімія і технологія полімерів. – Москва : Хімія, 2010. – 560 с.
5. Odian G. *Principles of Polymerization*. – 4th ed. – Hoboken : Wiley-Interscience, 2004. – 832 p.
6. Billmeyer F. W. *Textbook of Polymer Science*. – 3rd ed. – New York : Wiley, 2011. – 512 p.
7. Барабаш В. М. Автоматизація хіміко-технологічних процесів : навч. посіб. – Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – 368 с.
8. Семеренко Ю. І., Кравченко О. П. Системи автоматичного керування хімічними процесами. – Київ : Либідь, 2014. – 304 с.
9. Seborg D. E., Edgar T. F., Mellichamp D. A., Doyle F. J. *Process Dynamics and Control*. – 3rd ed. – Hoboken : Wiley, 2011. – 528 p.
10. Åström K. J., Hägglund T. *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*. – 2nd ed. – Research Triangle Park : ISA, 2006. – 343 p.
11. Luyben W. L. *Chemical Reactor Design and Control*. – Hoboken : Wiley, 2007. – 496 p.
12. Fogler H. S. *Elements of Chemical Reaction Engineering*. – 5th ed. – Boston : Pearson, 2016. – 720 p.

13. Biegler L. T., Grossmann I. E., Westerberg A. W. *Systematic Methods of Chemical Process Design*. – Upper Saddle River : Prentice Hall, 1997. – 796 p.
14. Bequette B. W. *Process Control: Modeling, Design, and Simulation*. – Upper Saddle River : Prentice Hall, 2003. – 768 p.
15. Іванов М. О. Промислові програмовані логічні контролери : навч. посіб. – Львів : Магнолія, 2018. – 256 с.
16. IEC 61131-3. Programmable controllers – Part 3: Programming languages. – International Electrotechnical Commission, 2013.
17. Bolton W. *Programmable Logic Controllers*. – 6th ed. – Oxford : Newnes, 2015. – 456 p.
18. Boylestad R., Nashelsky L. *Electronic Devices and Circuit Theory*. – 11th ed. – Boston : Pearson, 2013. – 992 p.
19. Popov S., Kagalovsky L. *SCADA Systems and Industrial Automation*. – Berlin : Springer, 2019. – 284 p.
20. Siemens AG. *SIMATIC S7 – System Manual*. – Munich : Siemens, 2020.
21. MathWorks Inc. *MATLAB & Simulink for Modeling and Control*. – Natick, MA, 2022.
22. Perry R. H., Green D. W. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. – 9th ed. – New York : McGraw-Hill, 2019. – 2400 p.
23. 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