



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ  
ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Першого (бакалаврського) рівня вищої освіти  
Спеціальність 151 – „Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології”

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_

д.т.н., проф. А.М. Тригуба

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2023 р.

## ***ЗАВДАННЯ***

на кваліфікаційну роботу студенту

Мучак Артем Романович

1. Тема роботи: «Автоматизація технологічного процесу кристалізації адипінової кислоти»

Керівник роботи Лиса Ольга Володимирівна, к.т.н., доцент.

Затверджені наказом по університету від 30 грудня 2022 року № 453/к-с.

2. Строк подання студентом роботи 15.06.2023 р.

3. Початкові дані до роботи: 1. Технологічна карта кристалізації адипінової кислоти; 2. Функціональні ознаки технологічного процесу кристалізації адипінової кислоти; 3. ДСТУ, СНіПи.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки:

1. Аналіз технологічного процесу як об'єкта керування

2. Розробка автоматизованої системи керування технологічним процесом кристалізації адипінової кислоти.

3. Оптимальне керування технологічним процесом

4. Охорона праці

5. Розрахунок економічної ефективності проектованої системи автоматизації

Висновки.

Список використаних джерел.

Додатки.

5. Перелік презентаційного матеріалу : \_\_\_\_\_  
Тема, автор, керівник роботи. Технологічна схема процесу кристалізації.  
Структурна схема взаємозв'язку між технологічними параметрами та факторами,  
що впливають на роботу кристалізатора. Схема регулювання процесу кристалізації.  
Схема автоматизації процесу кристалізації. Перехідний процес у САР із ПІД-  
регулятором

6. Консультанти з розділів:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1, 2, 3, 5	<i>Лиса О.В., доцент кафедри інформаційних технологій</i>		
4	<i>Городецький І.М., доцент кафедри управління проектами та безпеки виробництва</i>		

7. Дата видачі завдання 30 грудня 2023 р.

### **КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Написання першого розділу та означення головних завдань роботи</i>	30.12.22-01.01.23	
2	<i>Виконання другого розділу та формування головних показників для розрахунків</i>	01.01.23-01.02.23	
3.	<i>Виконання третього розділу та узагальнення отриманих результатів роботи</i>	01.02.23-01.03.23	
4.	<i>Виконання четвертого розділу та узагальнення вимог охорони праці</i>	01.02.23-01.03.23	
5.	<i>Вартісне оцінення ефективності пропозицій роботи</i>	01.03.23-01.04.23	
6.	<i>Завершення оформлення розрахунково-пояснювальної записки та презентації</i>	01.04.23-01.05.23	
7.	<i>Завершення роботи в цілому</i>	01.05.23-16.06.23	

Студент \_\_\_\_\_ Мучак А.Р.  
 (підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ Лиса О.В.  
 (підпис)

УДК 631.365.2

Автоматизація технологічного процесу кристалізації адипінової кислоти.  
Мучак А.Р. – Кваліфікаційна робота бакалавра. Кафедра інформаційних технологій – Дубляни, ЛНУП, 2023.

83 с. текст. част., 13 рис., 6 табл., 15 літ. джерел, 1 додаток.

Текстова частина включає вступ, п'ять розділів, висновки, список використаних джерел.

У вступі висвітлено суть процесу кристалізації, обґрунтовано необхідність автоматизації даного технологічного процесу.

В першому розділі подано опис технологічного процесу, описано матеріальний та тепловий баланс процесу, наведені теоретичні основи технологічного процесу в технологічному апараті.

В другому розділі виконано визначено і проаналізовано фактори, що впливають на технологічний процес, складено структурну схему взаємозв'язку між технологічними параметрами об'єкта, виконано технічне обґрунтування вибору функціональної схеми автоматизації та технічних засобів автоматизації.

У третьому розділі виконано розрахунок і моделювання системи автоматичного регулювання: вибрано структуру моделі, розраховано параметри моделі, розраховано параметрів настроювання автоматичного регулятора, описано схеми автоматизації, подано специфікацію засобів автоматизації.

У четвертому розділі розроблені заходи з охорони праці і навколишнього середовища.

У п'ятому розділі розраховано економічну ефективність від впровадження запропонованої системи автоматизації.

На підставі виконаної роботи зроблено відповідні висновки.

Ключові слова: автоматизація, технічні засоби, контролер, функціональна схема автоматизації, моделювання.

## АНОТАЦІЯ

В бакалаврській кваліфікаційній роботі проведена розробка системи автоматизації процесу кристалізації адипінової кислоти, зокрема розглянуто існуючі схеми автоматизації та синтезована ФСА для заданих умов роботи. Запропонована в кваліфікаційній роботі система керування технологічним процесом розроблена на основі мікропроцесорного контролера „Реміконт Р-130”. Впровадження таких технічних засобів підвищить надійність управління даним процесом.

Для заданих критеріїв якості регулювання були розраховані оптимальні параметри настройки ПІД-регулятора температури кристалізації. В середовищі SIMULINK пакету MATLAB був побудований перехідний процес з заданими критеріями якості регулювання.

Ключові слова: автоматизація, технічні засоби, контролер, функціональна схема автоматизації, моделювання.

## THE SUMMARY

In the bachelor's qualification thesis, the development of the automation system of the adipic acid crystallization process was carried out, in particular, the existing automation schemes were considered and the FSA was synthesized for the given operating conditions. The technological process control system proposed in the qualification paper was developed on the basis of the "Remicont R-130" microprocessor controller. The implementation of such technical means will increase the reliability of the management of this process.

For the given criteria of regulation quality, the optimal setting parameters of the PID regulator of the crystallization temperature were calculated. In the SIMULINK environment of the MATLAB package, a transient process was built with the specified control quality criteria.

Keywords: automation, technical means, controller, functional scheme of automation, modeling.

## ЗМІСТ

<b>Вступ</b>	8
<b>1. Аналіз технологічного процесу як об'єкта керування</b>	10
1.1. Опис технологічного процесу кристалізації адипінової кислоти	10
1.2. Теоретичні основи технологічного процесу в окремих технологічних апаратах і машинах	13
1.3. Матеріальний і тепловий баланси процесу кристалізації	18
<b>2. Розробка автоматизованої системи керування технологічним процесом кристалізації адипінової кислоти</b>	21
2.1. Вибір технологічних параметрів з точки зору завдання на автоматизацію	21
2.2. Обґрунтування номінальних значень параметрів технологічного процесу та допустимих відхилень від цих значень	22
2.3. Складання та аналіз структурної схеми взаємозв'язку між технологічними параметрами об'єкта	25
2.4. Техніко-економічне обґрунтування вибору функціональної схеми автоматизації	26
2.4.1. Аналіз структурної схеми взаємозв'язку між технологічними параметрами об'єкта	26
2.4.2. Визначення об'єму автоматизації технологічного процесу	26
2.4.3. Визначення функціональних ознак системи автоматизації	29
2.4.4. Аналіз існуючих схем автоматизації технологічного об'єкта керування	30
2.4.5. Синтез оптимальної спрощеної системи автоматизації для заданих умов роботи об'єкта	31
2.5. Вибір технічних засобів автоматизації	32
2.5.1. Вибір первинних вимірювальних перетворювачів та виконавчих механізмів	32
2.5.2. Вибір мікропроцесорних засобів автоматизації	37
2.6. Програмне забезпечення системи керування	42

<b>3. Оптимальне керування технологічним процесом</b>	<b>46</b>
3.1. Складання математичної моделі об'єкта регулювання і розрахунок її параметрів	46
3.2. Вибір і обґрунтування вимог до перехідного процесу контуру регулювання	47
3.3. Визначення закону регулювання	49
3.4. Розрахунок оптимальних настроювальних параметрів регулятора	51
3.5. Побудова перехідного процесу розрахованої САР	57
3.6. Опис функціональної схеми автоматизації	59
3.7. Специфікація на засоби автоматизації	61
<b>4. Охорона праці</b>	<b>64</b>
4.1. Аналіз стану виробничої санітарії і гігієни праці	64
4.2. Обґрунтування організаційно-технічних рекомендацій з охорони праці	65
4.3. Пожежна безпека	71
<b>5. Розрахунок економічної ефективності проектованої системи автоматизації</b>	<b>73</b>
<b>Висновки</b>	<b>81</b>
<b>Список використаних джерел</b>	<b>84</b>
<b>Додатки</b>	<b>85</b>

## ВСТУП

*Актуальність теми.* Тверда розчинена речовина виділяється з розчину за допомогою процесу кристалізації. Кристалізація — це процес, який використовується для отримання солей та інших хімічних речовин, а також для перекристалізації твердих речовин, щоб повернути їх до початкового стану.

Утворення кристалів із розчинів, розплавів і газів є процесом, відомим як кристалізація.

Створення кристалічних зародків і розвиток кристала є двома етапами кристалізації. Численні крихітні кристали утворюються, коли швидкість утворення ядер перевищує швидкість їх росту. Менше великих кристалів утворюється, коли швидкість росту перевищує швидкість зародження. Розмір кристалів можна змінити шляхом модифікації змінних, які впливають на швидкість утворення та зростання ядер.

За допомогою кристалізації здійснюються такі хіміко-технологічні процеси:

- 1) виділення твердих розчинених речовин із розчинів;
- 2) затвердіння розплавів;
- 3) розділення суміші речовин на фракції, збагачені будь-яким компонентом, а іноді на практично чисті компоненти;
- 4) глибока очистка речовин від домішок;
- 5) вирощування монокристалів.

Ці процеси підпорядковуються загальним закономірностям, але мають ряд технологічних особливостей, і більшою мірою різняться апаратним оформленням.

Процес кристалізації широко використовується в хімічній, нафтопереробній, металургійній, харчовій та інших галузях. Цінні хімічні сполуки добувають шляхом кристалізації з різноманітних рідин і розплавів. У кваліфікаційній роботі буде розглянуто автоматизацію технологічного процесу отримання адипінової кислоти.



Адипінова кислота, яку часто називають гександіоновою кислотою та 1,4-бутандикарбоною кислотою, є органічною сполукою. Вона широко використовується у харчовій промисловості як харчова добавка - антиоксидант E355, виробництві пластифікаторів, поліамідів і гербіцидів, в лакофарбовій, шкіряній і текстильній промисловості. Також її застосовують для відмивання від накипу внутрішніх поверхонь трубок, котлів, систем опалення та випаровування.

**Мета роботи** - розроблення нової системи керування технологічним процесом кристалізації адипінової кислоти.

**Предмет дослідження** - автоматизація процесу кристалізації адипінової кислоти. Запропонована в кваліфікаційній роботі система керування технологічним процесом розроблена на основі мікропроцесорного контролера „Реміконт Р-130”. Впровадження таких технічних засобів підвищить надійність управління даним процесом.

**Об’єктом дослідження** є технологічний процес кристалізації адипінової кислоти

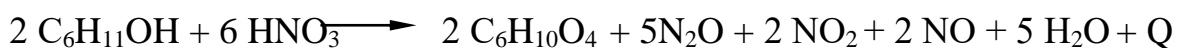
# 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

## 1.1. Опис технологічного процесу кристалізації адипінової кислоти

Суміш нітрату міді  $[\text{Cu}(\text{NO}_3)_2]$  і метаванадату амонію  $(\text{NH}_4\text{VO}_3)$  використовується як каталізатор для окислення циклогексанолу (анолу) або суміші циклогексанону та циклогексанолу (анолону) 40–55% азотною кислотою при температурах між 75 і 85° і атмосферного тиску для отримання адипінової кислоти  $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_4$ .

Адипінова кислота  $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_4$  утворюється в результаті реакції окислення, яка проходить через ряд проміжних стадій. Азотна кислота відновлюється у двоокис азоту, окис азоту та закис азоту. Реакція окислення проходить з виділенням тепла.

Основна реакція процесу:



Паралельно з основною реакцією протікає ряд побічних реакцій, в результаті яких в невеликих кількостях утворюються інші дикарбонові кислоти (янтарна, глутарова, щавелева) і двоокис вуглецю, а також незначна кількість мікрокарбонових кислот (оцтова, мурашина, пропіонова, масляна, валеріанова) і нітросполуки.

Процес окислення циклогексанолу азотною кислотою дає найбільшу кількість адипінової кислоти, якщо він проводиться при низьких температурах (нижче, ніж 50 °C). Проміжні продукти, що далі утворюють нижчі дикарбонові кислоти, в цих умовах отримуються лише в незначній кількості. Однак, окислення циклогексанолу до адипінової кислоти за низьких температур проходить повільно. Низькотемпературне окислення недопустиме також у випадку, якщо окисленню піддається суміш, що вміщує значну кількість циклогексанону, який практично не окислюється за низьких температур.

Швидкість реакції перетворення проміжних продуктів в адипінову кислоту зростає у разі підвищення температури і збільшення кислотності середовища, однак, за температури вище ніж 50 °C окислення циклогексанолу

проходить з утворенням проміжних продуктів, які далі перетворюються в нижчі дикарбонові кислоти, що знижує вихід адипінової кислоти.

Для отримання найбільшого виходу адипінової кислоти з циклогексанолу масова частка азотної кислоти в зоні реакції повинна бути від 40 до 50 %.

Через це проведення процесу при температурах від 75°C до 89°C з масовою часткою азотної кислоти від 35% до 42% не тільки скорочує час, необхідний для повного перетворення проміжних продуктів у кінцеві продукти з високим виходом бажаного продукту, але також дозволяє використовувати суміш циклогексанолу та циклогексанону як сировину, що важливо в реальних застосуваннях

Використання змішаного каталізатора з нітрату міді та метаванадію амонію підвищує вихід адипінової кислоти. Роль іонів міді зводиться до зв'язування оксидів азоту, що позитивно впливає на селективність окислення, а також на збільшення концентрації іонів нітрозилу в реакційній суміші, що призводить до збільшення швидкості стадій нітрузування.

Здатність азотної кислоти окислювати речовини та селективність окислення значно підвищуються додаванням метаванадію амонію.

Процес окислення за прийнятих умов характеризується 100 % перетворенням анолу, селективність процесу становить від 86 % до 93 %.

Реакція окислення проходить із значним виділенням теплоти і інтенсивним виділенням газів.

Вихід основного продукту складає 95-96%.

Адипінова кислота виділяється з реагентного розчину реагенту шляхом кристалізації. Технологічна схема процесу кристалізації, що проходить у апараті з виносом холодильником, зображена на рис. 1.1.

Реагентний розчин, що утворився в результаті реакції окислення циклогексанолу 40-55%-ою азотною кислотою, з витратою  $F_n$  та температурою  $T_n$  поступає в кристалізатор 2, де змішується з маточним розчином. Потім ця суміш циркуляційним насосом 4 подається в холодильник 1, в якому вона охолоджується та отримує незначне перенасичення за допомогою холодоносія.

Холодоносій поступає в холодильник з витратою  $F_x$  та температурою  $T_x$ . Далі ця перенасичена суміш повертається в кристалізатор, в якому зростають кристали за рахунок існуючого перенасичення. Частина маточного розчину знову змішується з свіжим початковим розчином і подається на охолодження, а частина з витратою  $F_m$  та температурою  $T_m$  виводиться з апарату. Готовий кристалічний продукт неперервно відводиться з нижньої частини корпусу кристалізатора за допомогою насоса суспензії 3.

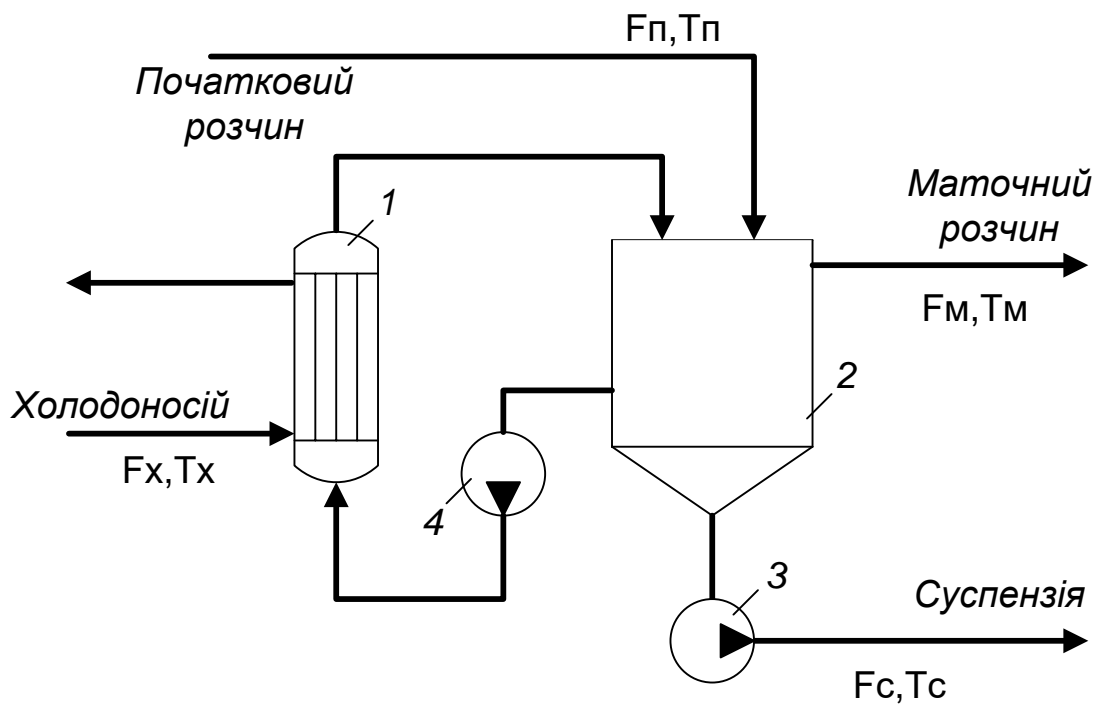


Рис. 1.1. Технологічна схема процесу кристалізації

1- холодильник; 2-кристалізатор; 3-насос суспензії; 4-циркуляційний насос;  $F_c, T_c$  – відповідно витрата та температура суспензії;  $F_m, T_m$  – відповідно витрата та температура маточного розчину;  $F_p, T_p$  – відповідно витрата та температура початкового розчину;  $F_x, T_x$  – відповідно витрата та температура холодоносія

Технічним показником процесу кристалізації, метою якого є тільки виділення твердої речовини із розчину, є *ступінь кристалізації*, що виражається відношенням кількості виділеної твердої речовини до її вмісту у початковому розчині.

Якщо в результаті кристалізації повинна бути досягнута також очистка основної розчиненої речовини від супроводжуючих домішок, то показником процесу також є степінь очистки.

## **1.2. Теоретичні основи технологічного процесу в окремих технологічних апаратах і машинах**

Розглянемо умови рівноваги між твердою (кристали) і рідкою (розчинник) фазами, щоб краще зрозуміти фізичне значення кристалізації. Більшість хімічних речовин стають більш розчинними при вищих температурах. Ці речовини мають "додатну" розчинність. Розчинність деяких речовин "від'ємна", тобто понижується з підвищенням температури розчину. Розчин, який знаходиться у рівновазі з твердою фазою при даній температурі, називають насиченим розчином. В насичених розчинах між кристалами і розчином виникає рухома рівновага, при якій кількість кристалів, які розчиняються і знову кристалізуються однакова в одиницю часу. При певних умовах концентрація розчиненої речовини може бути більша, ніж розчинність такої речовини. Такі розчини називають перенасиченими розчинами і вони нестабільні, легко переходять в стан насичення. При цьому з таких розчинів випадають кристали (частина твердої фази).

На швидкість кристалізації впливають: ступінь перенасичення розчинів, їх температура, утворення зародків кристалізації, інтенсивність перемішування, наявність сторонніх домішок тощо. При масовій кристалізації із розчину виникнення зародків кристалів та ріст самих кристалів протікає одночасно, що затрудняє вивчення кінетики процесу.

### *Утворення зародків кристалів*

У переохолоджених або перенасичених рідинах спонтанно виникають зародки або центри кристалізації. Сучасні уявлення припускають, що коли частинки стикаються в розчині, ядра виникають за рахунок утворення сполук частинок. Зародки знаходяться в рухомій рівновазі з розчином і видима кристалізація не проходить. Такий прихований період називають індукційним.

В залежності від природи розчиненої речовини та розчинника, ступеня перенасиченості, наявності домішок, індукційний період може продовжуватися від секунд до декількох місяців. Його можна скоротити внесенням в перенасичений розчин кристалів розчиненої речовини - "наживки". Початок масової кристалізації відповідає моменту порушення рухомої рівноваги між зародками та розчином. Швидкість утворення зародків може бути збільшена шляхом підвищення температури, перенасиченням розчину, зовнішніх механічних впливів (струшування, удари, тертя тощо). Великий вплив на процес утворення зародків також створює мікропориста структура стінок кристалізаторів, матеріалу мішалки, наявність в розчині твердих тіл з більшою поверхнею.

### *Ріст кристалів*

На створеному зародку, який вже досяг критичних значень, виростає кристал. Завдяки величезній поверхневій енергії такого ядра адсорбуються всі новоутворені частинки розчиненої речовини. Тверді частинки домішок також можуть поглинати речовини з розчину. Це призводить до утворення центрів кристалізації, які називаються кристалізацією на підкладці.

Усі грані кристала розвиваються одночасно, але при різній лінійній швидкості росту окремих його граней. Деякі з них зникають, а інші зростають; це призводить до зміни зовнішнього вигляду кристала.

Зародження і зростання кристалів відбувається повільніше при низьких перенасиченнях. У цьому випадку кристал розвивається в результаті приєднання окремих іонів (або молекул) і двовимірних ядер; в результаті її грані рівномірно збільшуються, а форма наближається до ідеальної. З іншого боку, при високих рівнях перенасичення розчину включення тривимірних зародків (більш товсті шари) і мікроутворень (відносно великі блоки) прискорює ріст кристалів. У той же час структура кристала відхиляється від ідеального стану через різницю в швидкості росту окремих граней. Приєднання крупних блоків часто призводить до утворення розгалужених кристалічних агрегатів (дендритів) та до їх забруднення прошарками маточного

розчину. Зі збільшенням перенасичення розчину швидкість росту кристалів відстає від швидкості утворення зародків (перенасичення витрачається переважно на утворення нових зародків), тому середній розмір утворених кристалів є меншим. Отже, для отримання крупнокристалічного продукту процес необхідно проводити при невеликому перенасиченні. На практиці зазвичай ставлять собі за мету отримання крупних та однорідних кристалів, так як їх легше відділити від маточного розчину шляхом фільтрації, а також вони є зручними для упаковки, зберігання та дозування.

Іншими методами збільшення розмірів кристалів є введення в розчин (готових центрів кристалізації, видалення найдрібніших кристалів в процесі кристалізації, а також повторна обробка кристалічного продукту в насиченому розчині.

Швидкість росту кристалів часто позитивно корелює з температурою кристалізації. При більш високій температурі в'язкість розчину знижується і таким чином полегшується дифузія. Але в більшій мірі вплив температури відображається на збільшенні числа зародків, що, як відомо, приводить до утворення більш дрібних кристалів. При додатній розчинності з підвищенням температури кристалізації зменшується ступінь перенасиченості розчину, що, в свою чергу, викликає зменшення рушійної сили процесу.

#### *Кристалізація в псевдозрідженому стані*

Найбільше на процес кристалізації впливає тип температурної залежності розчинності речовини. При охолодженні гарячих розчинів кристалізуються речовини, розчинність яких істотно залежить від температури. В цьому випадку початкова кількість розчинника (він знаходиться в маточному розчині) лишається в системі постійною, тому даний процес називається ізогідричним.

Завдяки дифузії матеріалу до сторін росту кристалів під час інтенсивного змішування в умовах псевдозрідження швидкість подачі матеріалу зростає, прискорюючи ріст кристалів. При цьому швидко зменшується ступінь перенасичення розчину. При великих швидкостях розчину, як відомо, збільшується швидкість утворення зародків, що може привести до пониження

розмірів кристалів. При однакових температурах та гідродинамічних умовах, із зменшенням ступені перенасичення швидкість росту кристалів зростає в більшій мірі, ніж швидкість росту зародків. Таким методом проводять кристалізацію відносно малоперенасичених розчинів, регулюючи ступінь перенасичення, температуру, співвідношення кількості кристалів та розчину, а також час перебування кристалів в апараті. Великі кристали осаджуються на дно, а більш менші кристали продовжують зростати в псевдозрідженому шарі. Частина дрібних кристалів і зародків потоком розчину виноситься із апарату. Це збільшує середній розмір отриманих кристалів.

Широкого застосування в промисловості набули кристалізатори з псевдозрідженим шаром, які виготовляються у різних конструктивних модифікаціях.

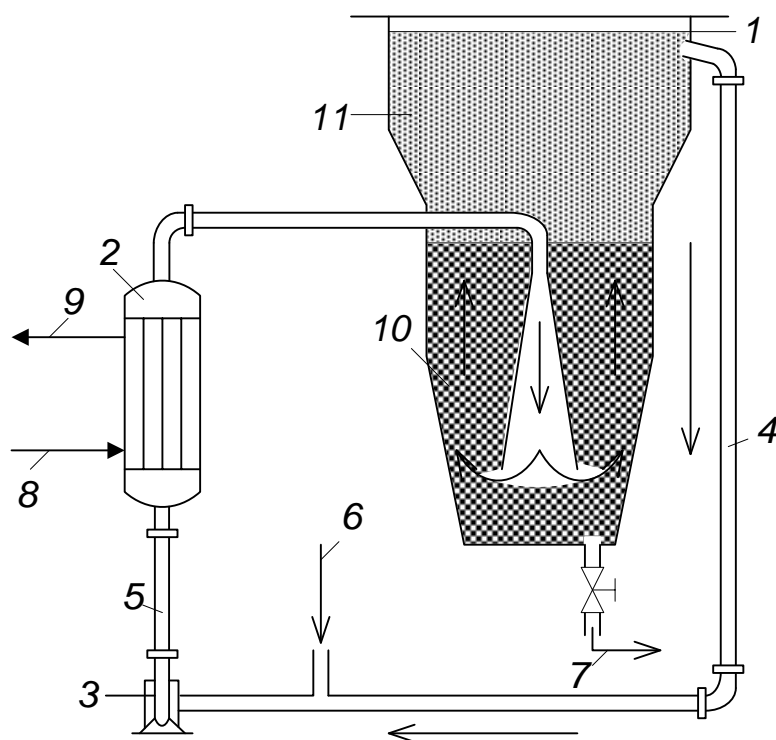


Рис.1.2. Кристалізатор з псевдозрідженим шаром для ізотермічної кристалізації:  
 1 - корпус; 2 -холодильник; 3 –циркуляційний насос; 4 –всмоктувальна лінія циркуляційного контуру; 5 –напірна лінія; 6 –вхід свіжого розчину; 7 – вихід кристалічного продукту; 8,9 –вхід та вихід охолоджуючої води, 10 – готовий кристалічний продукт, 11 – маточний розчин.



Обладнання для ізогідричної кристалізації, який складається із корпусу, кожухотрубного холодильника та циркуляційного насоса зображено на рис.1.2. Висота апарату складає 5м, діаметр нижньої частини – 3м, середньої – 4м, а діаметр верхньої частини апарату рівний 6м. Гарячий концентрований розчин неперервно притікає у всмоктувальну циркуляційну трубу і змішується з циркулюючим потоком маточного розчину. Цей потік в десятки раз перевищує кількість поступаючого свіжого розчину, тому концентрація і температура утвореного змішаного розчину збільшуються дуже повільно. Відповідно, при охолодженні в кожухотрубному холодильнику змішаний розчин, який транспортується циркуляційним насосом, отримує невелике перенасичення. Далі розчин поступає в нижню частину корпусу, де висхідним потоком псевдозріджується шар кристалів, які зростають за рахунок перенасичення розчину.

Маточний розчин, що містить дуже дрібні кристали, неперервно повертається у всмоктувальну трубу циркуляційного контуру, знову змішується з припливним початковим розчином, і цикл повторюється. Завдяки невеликому перенасиченню розчину швидкість утворення зародків є малою і переважаюча частина речовини, яка виділяється в результаті перенасичення, витрачається на ріст кристалів. Готовий кристалічний продукт неперервно відводиться з нижньої частини корпусу.

Витрату та температуру охолоджуючої рідини (води) вибирають з розрахунком на створення рівномірної та невисокої різниці температур в холодильнику задля уникнення місцевих перенасичень та інкрустації поверхні теплообміну. З цією метою іноді організують окремий циркуляційний контур охолоджуючої рідини, що забезпечує бажані температури її входу та виходу. Так можна отримати досить крупні кристали (до 3 мм і більше).

У кристалізаторах з псевдозрідженим шаром кристалізують розчини з невеликим ступенем перенасичення, через це продуктивність апаратів невелика. Основна їх перевага - отримують великі кристали з від'ємною розчинністю.

### 1.3. Матеріальний і тепловий баланси процесу кристалізації

#### Матеріальний баланс

##### 1.3.1. Кристалізація з видаленням частини розчинника

Позначимо:  $G_p, G_{кр}, G_M$ - кількості початкового розчину, отриманих матеріалів та маточного розчину відповідно, в кг;

$b_p, b_M$ - концентрації початкового та маточного розчинів, ваг%;

$a = M/M_{кр}$ -відношення молекулярних ваг абсолютно сухої розчиненої речовини та кристалогідрату (для водного розчину кристалогідрату); при кристалізації без приєднання молекул розчинника  $M = M_{кр}$  та  $a = 1$ ;

$W$ - кількість видаленого розчинника, кг.

Тоді загальний баланс буде:

$$G_p = G_{кр} + G_M + W \quad (1.1)$$

Баланс по сухій речовині буде:

$$G_p b_p = G_{кр} a + G_M b_M \quad (1.2)$$

Вагова кількість отриманих кристалів визначається спільним розв'язком рівнянь (1.1) та (1.2). Часто  $G_p, b_p, b_M$  та  $a$  - відомі величини;  $W$  вираховують по заданих  $G_p, b_p$  та  $b_M$ .

Величина  $G_{кр}$  складає:

$$G_{кр} = \frac{G_p (b_M - b_p) - W \cdot b_M}{b_M - a} \quad (1.3)$$

При  $a = 1$  маємо:

$$G_{кр} = G_p \left( 1 - \frac{b_p}{b_M} \right) \cdot W \quad (1.4)$$

##### 1.3.2. Кристалізація без видалення розчинника ( $W=0$ ).

Кількість отриманих кристалів:

$$G_{кр} = \frac{G_p (b_M - b_p)}{a - b_M} \quad (1.5)$$

При  $a = 1$  знаходимо:

$$G_{кр} = \frac{G_p b_p - b_M}{1 - b_M} \quad (1.6)$$

При випаровуванні розчинника в газ (повітря) витрата газу (в кг) визначається за рівнянням:

$$L = \frac{W}{x_2 - x_1} \quad (1.7)$$

де  $L$  - витрата сухого газу (повітря), кг;  $x_2, x_1$  - кінцевий та початковий вологовміст газу (повітря), в кг вологи на кг сухого газу.

### Тепловий баланс

При розчиненні твердої кристалічної речовини проходить поглинання тепла  $q_{\delta\delta}$  для руйнування кристалічної решітки (теплота плавлення) та виділення тепла при хімічній взаємодії речовини з розчинником  $q_{\delta}$  (утворення гідратів). В залежності від величини  $q_{\delta\delta}$  та  $q_{\delta}$  тепловий ефект кристалізації може бути або позитивним, або негативним.

Введемо позначення (окрім раніше введених):

$i_p, i_{кр}, i_m$  - ентальпія розчину, кристалів та маточного розчину, кДж/кг;

$i_{t1}, i_{t2}$  - початкова та кінцева ентальпії теплоносія, кДж/кг;

$i_{o1}, i_{o2}$  - початкова та кінцева ентальпії охолоджуючої рідини, кДж/кг;

$I$  - ентальпія пароподібного розчинника, кДж/кг;

$r$  - теплота утворення кристалічної решітки (теплота твердження), кДж/кг;

$q$  - тепловий ефект концентрування розчину при зміні його концентрації від  $b_p$  до  $b_m$ , кДж;

$G_T, G_o$  - кількість теплоносія чи охолоджуючого середовища, кг/сек.

В загальному випадку матимемо:

Таблиця 1.1.

### Тепловий баланс процесу кристалізації

Прихід тепла		Витрати тепла	
З розчином	$G_p i_p = Q_1$	З кристалами	$G_{кр} i_{кр} = Q_5$
Теплота кристалізації	$G_{кр} r = Q_2$	З маточним розчином	$G_m i_m = Q_6$
Теплота дегідратації	$q G_m b_m = Q_3$	З парами розчинника	$W_I = Q_7$
Отримано від теплоносія	$G_T (i_{t1} - i_{t2}) = Q_4$	З охолоджуючим агентом	$G_T (i_{t2} - i_{t0}) = Q_8$
		Втрати в навколишнє середовище	$Q_9$

Тоді запишемо:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_9$$

При кристалізації з охолодженням  $Q_4=0$  та  $Q_7=0$ ; а при кристалізації з випаровуванням частини розчинника  $Q_8=0$ ; при вакуумній кристалізації  $Q_4=0$  та  $Q_8=0$ .

Для теплоносія - насиченої пари (в кДж)

$$Q_4 = D(I_D - i_{\text{конд}})$$

де  $I_D$ ,  $i_{\text{конд}}$  - ентальпія пари та конденсату, кДж/кг;  $D$  - витрата пари, кг/с.

Для охолоджуючого середовища - повітря (в кДж/с)

$$Q_8 = L(I_2 - I_1)$$

де  $L$  - витрата сухого повітря, кг/сек;  $I_2, I_1$  - його початкова та кінцева ентальпії, кДж/кг.

В залежності від температурних умов, втрати тепла  $Q_9$  можуть бути позитивними та негативними.

Ентальпії  $t_p$ ,  $t_{кр}$ ,  $i_m$  розраховують (в кДж/кг) за загальним рівнянням:

$$i = c(t_2 - t_1)$$

в якому  $c$  - середня теплоємність, кДж/(кг\*К);  $(t_2 - t_1)$  - перепад температур (кінцеве та початкове значення температури).

Напруженість поверхні по випареній волозі у повітряних кристалізаторах в середньому приймають 0,042 кг/(м<sup>3</sup>\*год). Розрахунок розмірів поверхні охолодження або нагріву проводять за загальними правилами розрахунку теплообмінних апаратів.

## **2. РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ КРИСТАЛІЗАЦІЇ АДИПІНОВОЇ КИСЛОТИ**

### **2.1. Вибір технологічних параметрів з точки зору завдання на автоматизацію**

Розмір кристалів, які утворюються, є ознакою того, наскільки добре пройшов процес. Метою керування є отримання кристалів однакового розміру, щоб забезпечити текучість і запобігти агрегації кристалічних сполук. Розмір кристалів, з одного боку, визначається умовами, при яких здійснюється процес, (витрата і концентрація початкового розчину; інтенсивність охолодження розчину, яка визначається інтенсивністю перемішування; температура кристалізації; вміст домішок в розчині та інші фактори), а з іншого – властивостями розчину, що поступає на кристалізацію (ступенем насичення твердої фази – початковою концентрацією, а також температурою, наявністю домішок).

Розмір і кількість кристалів є вихідними величинами кристалізатора. Обидва параметри контролювати важко, тому основною вихідною величиною кристалізатора вважають температуру розчину в апараті. У більшості ситуацій ця температура регулюється зміною потоку холодної води.

Оскільки змінити ці параметри складно — концентрація та температура початкового розчину часто встановлюються ходом попереднього технологічного процесу, — їх значення контролюються.

Швидкість, з якою розчин рухається через кристалізатор, впливатиме на те, наскільки швидко обладнання охолоджує розчин при постійній температурі. Для підтримання її на постійному рівні стабілізують витрату розчину.

Інтенсивність перемішування розчину в кристалізаторі при використанні циркуляційного насоса з постійними характеристиками можна вважати сталою.

Температура холодної води змінюється незначно і її вплив на роботу кристалізатора незначний, тому основним фактором, що впливає на

температуру розчину в апараті є витрата холодної води, і вона служить керуючою дією.

Матеріальну рівновагу кристалізатора підтримують регулюванням рівня шару кристалів в апараті шляхом зміни витрати суспензії.

Маточний розчин виводиться з апарату за рахунок вільного переливу, тому його витрата не регулюється, а лише контролюється..

Вплив перелічених факторів на ефективність процесу кристалізації враховується при виборі та розміщенні пристроїв для регулювання температури, рівня в кристалізаторі та витрати початкового розчину, виборі і обґрунтуванні систем автоматичного регулювання.

## **2.2. Обґрунтування номінальних значень параметрів технологічного процесу та допустимих відхилень від цих значень .**

Гарячий концентрований розчин адипінової кислоти неперервно поступає у припливну циркуляційну трубу і змішується з циркулюючим потоком маточного розчину. Потім ця суміш поступає на охолодження в кожухотрубний холодильник, вводиться в нижню частину корпусу кристалізатора, де висхідним потоком псевдозріджується шар кристалів, що ростуть за рахунок перенасичення розчину. Маточний розчин неперервно повертається у всмоктувальну трубу циркуляційного контуру і цикл повторюється.

В даному випадку кристалізація є однократною з повним поверненням маточного розчину у розчинник. Така технологічна схема застосовується для виділення розчиненої речовини без її очистки від домішок. Масова частка твердої фази у суспензії становить приблизно 20%.

Номінальна температура в апараті для процесу кристалізації адипінової кислоти становить 45 °С. Температура кристалізації повинна підтримуватися номінальною впродовж всього процесу за рахунок зміни витрати холодоносія (води). Згідно вимог до якості процесу кристалізації температура в апараті повинна підтримуватися в діапазоні 40-50°С. Допускаються короточасні відхилення температури за встановлені межі, але не нижче 30°С і не вище 55°С.

Велику роль для процесу кристалізації відіграє вибір номінальних значень витрати і температури холодоносія. Їх вибирають з розрахунку на створення рівномірної і невисокої різниці температур в холодильнику для уникнення місцевих перенасичень та інкрустації поверхні теплообміну. Витрату охолоджувальної води доцільно з часом поступово збільшувати, для підтримання різниці температур розчину і води приблизно постійною (8-10 °С). Тому номінальним значенням температури охолоджуючої води є 10°С, витрати – 30 м<sup>3</sup>/год.

Перемішування використовується для прискорення кристалізації та зменшення ймовірності утворення нальоту на охолоджуваних поверхнях. Також завдяки перемішуванню кристали омиваються розчином з усіх боків, що забезпечує правильність їх форми. З іншого боку, поєднання перемішування та інтенсивного охолодження розчину сприяє зародженню кристалів. Процес перемішування здійснюється за рахунок циркуляції розчину в кристалізаторі та псевдозрідження шару кристалів.

Концентрація твердої фази у вихідному розчині, його температура та наявність домішок є початковими параметрами процесу, що визначаються попереднім технологічним процесом. Їх зміни будуть приводити до порушення технологічного режиму кристалізації.

Температура початкового розчину становить 60°С, а концентрація адипінової кислоти в ньому не менше 1220 кг/м<sup>3</sup>.

Номінальне значення рівня становить 4м. Для підтримання матеріального балансу кристалізації, рівень в апараті потрібно підтримувати на заданому значенні протягом всього процесу з точністю  $\pm 20$  см.

Велике значення для процесу має витрата початкового розчину. Від неї залежить продуктивність процесу, величина, кількість та чистота кристалів. Номінальне значення цієї витрати 50 м<sup>3</sup>/год. Витрату початкового розчину необхідно стабілізувати з точністю  $\pm 5$  м<sup>3</sup>/год. Допустимі короткочасні відхилення витрати:  $\pm 10$  м<sup>3</sup>/год.

Потік маточного розчину в процесі кристалізації постійно циркулює. Він у десятки раз більший за потік свіжого розчину, який поступає на кристалізацію. Тому концентрація і температура маточного розчину змінюються незначно.

З метою визначення впливу різних режимних факторів проводяться спеціальні дослідження, з допомогою яких визначаються експлуатаційні значення технологічних параметрів, яких слід дотримуватися для досягнення надійної та економічної роботи кристалізатора. Значення технологічних параметрів, визначені за результатами досліджень, наводяться в технологічній карті в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

## Технологічна карта

№ п/п	Назва параметру	Одиниця вимірювання	Номінальне значення	Допустимі відхилення
1	Температура в кристалізаторі	°С	45	± 5
2	Витрата початкового розчину	м <sup>3</sup> /год	50	± 5
3	Рівень в апараті	м	4	±0.2
4	Витрата холодоносія	м <sup>3</sup> /год	30	± 5
5	Витрата суспензії	м <sup>3</sup> /год	20	±5
6	Витрата маточного розчину	м <sup>3</sup> /год	30	±5
7	Температура початкового розчину	°С	60	± 5
8	Температура холодоносія	°С	10	± 5



### 2.3. Складання та аналіз структурної схеми взаємозв'язку між технологічними параметрами об'єкта

Структурна схема взаємозв'язку між технологічними параметрами об'єкта наведена на рис. 2.1.

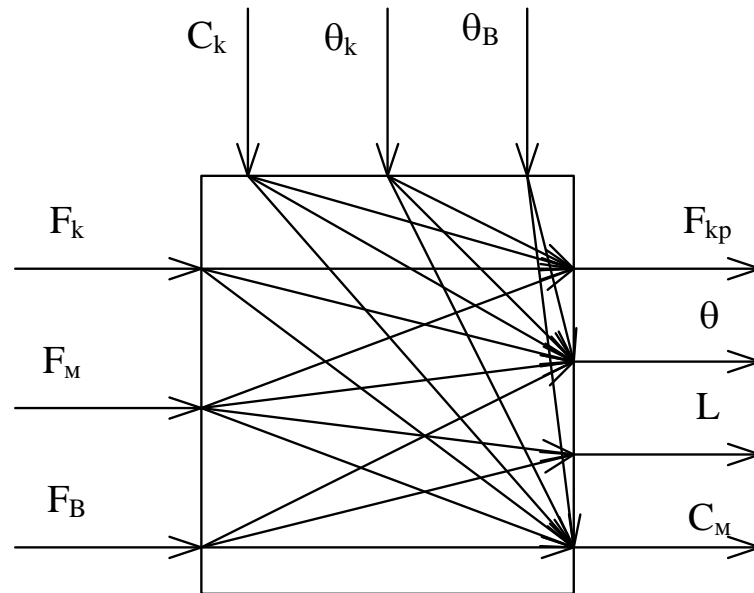


Рис.2.1. Структурна схема взаємозв'язку між технологічними параметрами та факторами, що впливають на роботу кристалізатора  
Як об'єкт регулювання розглядаємо кристалізатор неперервної дії .

Для даного об'єкта регулювання вхідними величинами будуть:

$F_M$  – витрата маточного розчину;

$F_k$  – витрата концентрованого розчину;

$F_B$  – витрата холодної води.

*Збурюючі величини:*

$\theta_k$  – температура початкового розчину;

$\theta_B$  – температура холодної води;

$C_k$  – концентрація початкового розчину.

*Вихідні величини:*

$F_{kp}$  – витрата кристалів;

$\theta$  – температура кристалізації;

$C_M$  – концентрація маточного розчину;

$L$  – рівень в кристалізаторі.

## **2.4. Техніко-економічне обґрунтування вибору функціональної схеми автоматизації**

### **2.4.1. Аналіз структурної схеми взаємозв'язку між технологічними параметрами об'єкта**

Вхідними величинами кристалізатора є витрата початкового концентрованого розчину  $F_k$ , витрата маточного розчину  $F_m$  та витрата холодної води  $F_v$ .

Вихідними величинами кристалізатора є витрата кристалів  $F_{кр}$ , температура кристалізації  $\theta$ , рівень  $L$  в кристалізаторі та концентрація маточного розчину  $C_m$ .

Оскільки ці параметри — концентрація початкового розчину  $C_k$  та його температура  $\theta_k$  - визначаються ходом попереднього технологічного процесу і впливати на ці параметри важко, тому їх значення контролюють. Всі наведені параметри впливають на вихідні величини. Аналізуючи структурну схему взаємозв'язку між технологічними параметрами і сам процес кристалізації, можна зробити висновок, що такі вхідні величини, як концентрація початкового розчину  $C_k$ , концентрація маточного розчину  $C_m$  незначно впливають на температуру розчину в апараті та на його рівень (до 5 %). Тому ці параметри не враховуватимуться під час розроблення системи регулювання. А витрата початкового концентрованого розчину  $F_k$ , його температура  $\theta_k$ , витрата маточного розчину  $F_m$ , витрата холодної води  $F_v$  та її температура  $\theta_v$  мають значний вплив на вихідну величину, тому значення цих параметрів буде враховане під час автоматизації процесу кристалізації.

### **2.4.2. Визначення об'єму автоматизації технологічного процесу**

Проектована система автоматизації повинна надійно захистити технологічне обладнання, оперативний персонал, довкілля, забезпечити найбільшу кількість функціональних ознак. Обсяг одержуваної технологічної інформації повинен бути достатнім для розрахунку техніко-економічних показників та прогнозування надійної роботи системи.

Автоматизоване керування процесом кристалізації передбачає обов'язкову участь оператора. При цьому керування всіма операціями здійснюється з одного пункту – БЩУ (Блочного Щита Управління).

Для виконання керування всіма операціями з одного пункту автоматизована система керування повинна мати наступні підсистеми:

- дистанційний контроль;
- дистанційне керування;
- сигналізацію;
- захист і автоматичне регулювання.

До регульованих технологічних параметрів відносять такі вихідні величини об'єкта, які найбільше впливають на проходження технологічного процесу. Регульованими технологічними параметрами у процесі кристалізації є: температура в кристалізаторі, яка залежить від витрати та температури початкового розчину та холодоносія; рівень у апараті, який залежить від витрати суспензії, маточного, початкового розчинів та холодоносія; витрата початкового розчину. Для підтримання температури в кристалізаторі на заданому значенні, регулююча дія має бути спрямована на зміну ступеня відкриття регулюючого органу на лінії подачі холодоносія. Для підтримання рівня в апараті на заданому значенні регулююча дія має бути спрямована на зміну ступеня відкриття регулюючого органу на лінії суспензії з кристалами. Для підтримання витрати початкового розчину на заданому значенні регулююча дія має бути спрямована на зміну ступеня відкриття регулюючого органу на лінії його подачі.

Для того, щоб мати можливість керувати з одного місця та здійснювати дистанційний контроль за об'єктом керування, необхідно на це місце вивести виміри всіх контрольованих параметрів.

Контрольовані технологічні параметри вибирають так, щоб їх кількість була мінімальною, але достатньою для отримання повної інформації про хід технологічного процесу.

У відповідності з діючими директивними вказівками контролюються наступні параметри процесу кристалізації:

- температура початкового розчину;
- температура холодоносія;
- температура маточного розчину;
- температура вихідної суспензії;
- температура кристалізації;
- витрата початкового розчину;
- витрата холодоносія;
- витрата маточного розчину;
- витрата вихідної суспензії;
- рівень розчину в апараті.

Всі ці параметри підлягають неперервному контролю з необхідністю їх показів та реєстрації.

Для полегшення контролю оператором за ходом процесу кристалізації застосовується світлозвукова сигналізація, котра спрацьовує при відхиленні найбільш важливих параметрів на певні значення. Сигналізації підлягають параметри, які можуть привести до аварії або істотно порушити технологічний режим. Таким параметром є температура кристалізації. Сигналізація відхилень цього параметру здійснюється від індивідуального пристрою. Цей сигнал виноситься на лампове табло.

Для полегшення виявлення спрацювання сигналу сигналізація відхилення виконана з блиманням кожного сигналу та подачею звуку по параметру, що відхилився за допустимі межі.

Якщо в ході проведення технологічного процесу виникають вибухо- та аварійно- небезпечні ситуації, то слід передбачити відповідний захист. Параметри такого захисту вибирають залежно від того, що може бути причиною аварії. Автоматичний захист передбачає виконання без втручання оператора окремих операцій керування при недопустимій зміні температури в кристалізаторі, а саме: припинення подачі початкового розчину шляхом закриття регулюючого органу на цій лінії.

Системи дистанційного керування, як правило входять в склад систем автоматичного регулювання. Незалежні контури використовують в тих випадках, коли необхідно реалізовувати дистанційно-логічні операції по керуванні технологічним обладнанням.

### 2.4.3.Визначення функціональних ознак системи автоматизації

Таблиця 2.2

#### Функціональні ознаки системи автоматизації

№ п/п	Обсяг авто- матизації	Показ	Реєстрація	Підсумовування	Усереднення	Визначення відхилення	Розрахунок техніко-економічних показників	Оптимізація	Сигналізація	Дистанційне керування	Захист	Блокування	Автоматичне регулювання
1	Рівень розчину в апараті	+	+							+			+
2	Витрата суспензії	+	+										
3	Витрата початкового розчину	+	+							+			+
4	Витрата маточного розчину	+	+										
5	Витрата холодоносія	+	+										
6	Температура в кристалізаторі	+	+						+	+	+		+
7	Режим роботи насоса вихідної суспензії	+							+	+			
8	Режим роботи насоса маточного розчину	+							+	+			

#### 2.4.4. Аналіз існуючих схем автоматизації технологічного об'єкта керування

Створення систем автоматизації процесу кристалізації по суті обмежується забезпеченням максимальної ефективності процесу (величина, кількість та розміри отриманих кристалів). Як було сказано раніше, у кристалізаторі цю умову визначають багато факторів, але основними серед них є рівень розчину в апараті, витрата та температура початкового розчину, витрата та температура холодоносія, температура кристалізації.

На рис. 2.2 зображена схема регулювання процесу кристалізації шляхом підтримування на постійному рівні витрати початкового розчину, температури та рівня в апараті. Температура в кристалізаторі стабілізується за допомогою зміни витрат початкового розчину та холодоносія. Регулююча дія вноситься зміною ступеня відкриття регулюючого органу, встановленому на лінії подачі холодоносія. Витрату початкового розчину підтримують на постійному рівні, змінюючи ступінь відкриття регулюючого органу на лінії подачі цього розчину. Для підтримання матеріального балансу кристалізатора стабілізують рівень в апараті. При цьому регулююча дія вноситься зміною витрати суспензії.

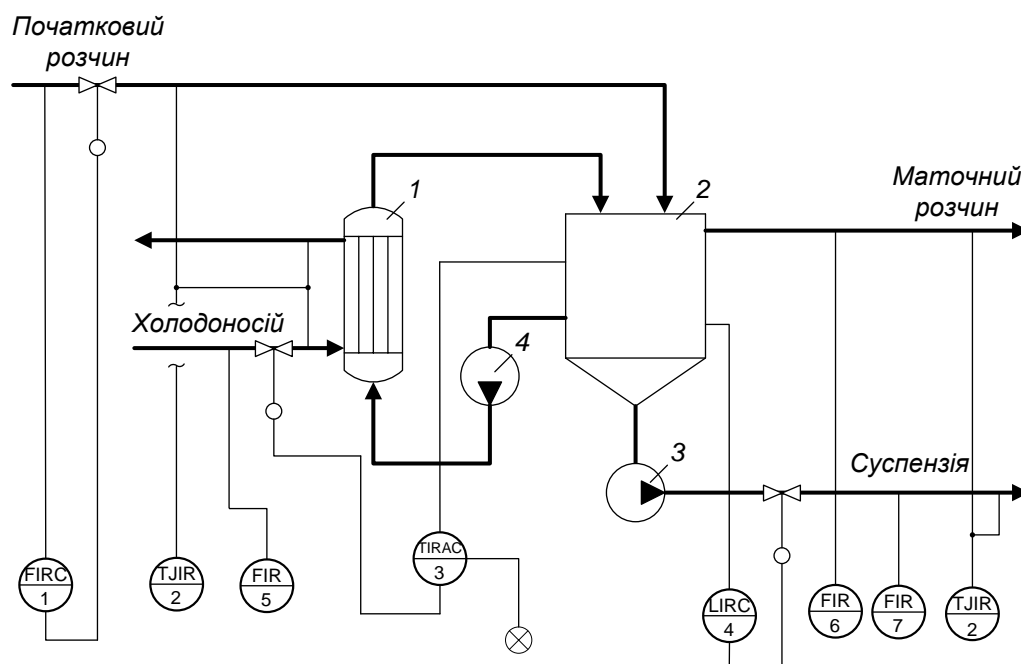


Рис.2.2. Схема регулювання процесу кристалізації:

1- холодильник; 2-кристалізатор; 3-насос суспензії; 4-циркуляційний насос.

Регулювання концентрації кристалів в суспензії. В окремих випадках параметром, що характеризує процес кристалізації, є концентрація кристалів в суспензії. Тоді необхідно керувати процесом таким чином, щоб концентрація кристалів була постійною і максимально можливою для даних умов. Концентрація кристалів в суспензії в певній мірі характеризує і їх розміри; наприклад, чим більша концентрація, тим інтенсивнішим є процес кристалізації і тим більшими є кристали. На практиці концентрацію кристалів визначають за густиною суспензії. Регулюючі дії вносять шляхом зміни витрати початкового розчину (рис. 2.3).

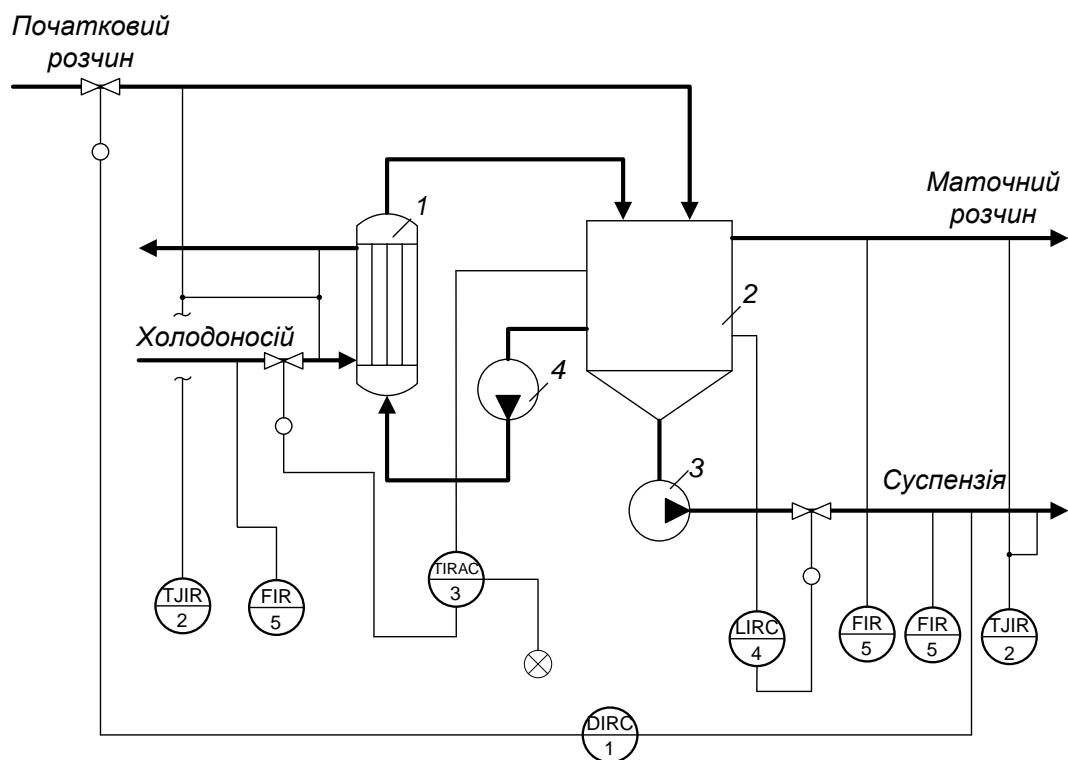


Рис.2.3. Схема регулювання концентрації кристалів в суспензії;  
1- холодильник; 2-кристалізатор; 3-насос суспензії; 4-циркуляційний насос.

#### 2.4.5. Синтез оптимальної спрощеної системи автоматизації для заданих умов роботи об'єкта

Для регулювання процесу кристалізації використовуємо схему регулювання за температурою в апараті. Вибрана схема регулювання підтримує потрібний показник ефективності процесу (кількість та розміри отриманих кристалів) не

тільки в стаціонарному режимі, але й при значних змінах навантаження та при виникненні порушень в самому технологічному процесі. Така схема забезпечує необхідні показники якості перехідного процесу та достатню стійкість системи (рис. 2.4).

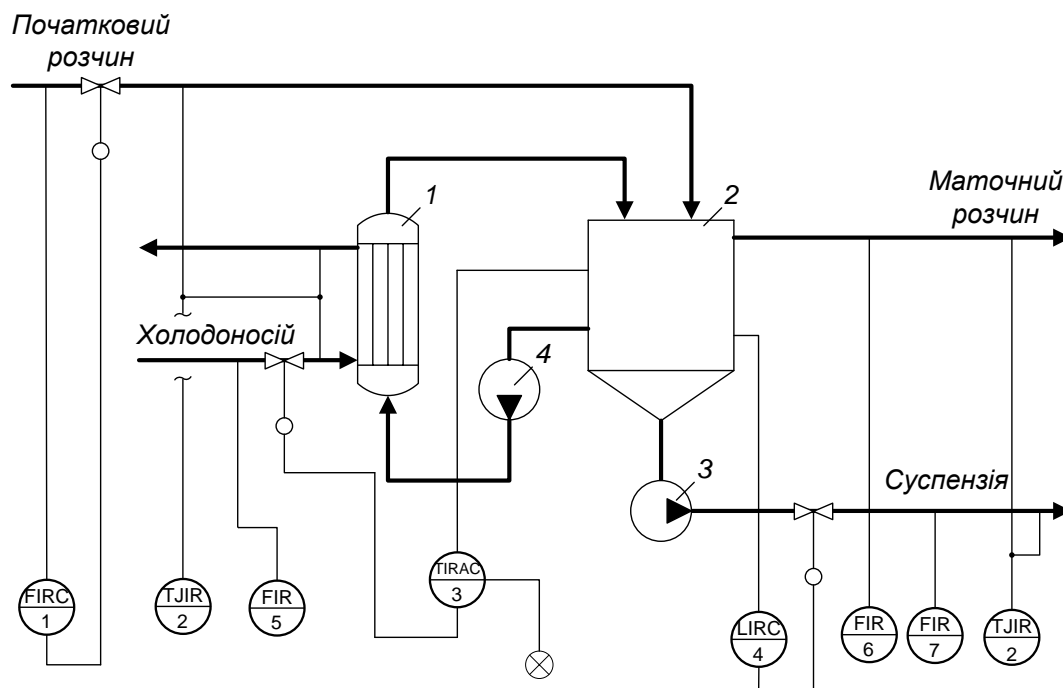


Рис.2.4. Схема автоматизації процесу кристалізації:

1- холодильник; 2-кристалізатор; 3-насос суспензії; 4-циркуляційний насос

## 2.5. Вибір технічних засобів автоматизації

### 2.5.1. Вибір первинних вимірювальних перетворювачів та виконавчих механізмів

Важливо підтримувати температуру, рівень в апараті, витрату початкового розчину на постійному рівні, щоб автоматизувати процес кристалізації.

Ми будемо використовувати вимірювальну систему, яка містить датчик потоку SITRANS F M MAGFLO типу MAG 3100 і перетворювач сигналу MAG 5000 для вимірювання витрат початкового розчину, холодної води, маточного розчину та вихідної суспензії. В цій системі застосовується магнітно-індуктивний принцип вимірювання з пульсуючим постійним полем. Максимальна похибка вимірювання перетворювача MAG 5000 разом із давачем складає 0,5% від вимірюваної величини витрати. Перетворювач має наступні



вихідні сигнали: 1 струмовий (0(4)-20 мА) , 1 релейний, 1 цифровий. Живлення приладу здійснюється за допомогою: 11-24 В постійного/змінного струму, 115-230 В змінного струму. Перетворювач MAG 5000 має також функцію індикації – 3-рядковий дисплей.

Рівень кристалів у кристалізаторі потрібно підтримувати на постійному рівні для автоматизації процесу. Рівень в апараті мірятимемо за допомогою хвилеводного радарного давача рівня *Rosemount моделі 3302* з діапазоном вимірювання від 0,1 до 20 м. Значення рівня перетворюється в сигнал постійного струму 4-20 мА.

Давачі рівня *Rosemount 3300* побудовані на технології рефлектометрії з тимчасовим дозволом (TDR = Time Domain Reflectometry). Рівень вимірюється за допомогою мікрохвильового імпульсу малої потужності тривалістю в одну наносекунду, що направляється по зонду зануреному у продукт, рівень якого необхідно виміряти. Коли імпульс досягає поверхні середовища з іншою діелектричною проникністю, частина енергії відбивається назад до давача. Часовий інтервал між переданим (опорним) сигналом і відбитим імпульсом пропорційний відстані до поверхні продукту. Завдяки тому, що на імпульси, котрі посилає радар, практично не впливає дія вимірюваного продукту і газового середовища резервуару, температура і тиск, форма резервуару і устаткування, встановленого всередині резервуару, досягається висока точність вимірювань.

До кожного пристрою серії 3300 додаються зонди, довжина яких вказується користувачем при замовленні і корпус електроніки, який розділений на два відсіки. Модульна конструкція приладу дозволяє зняти корпус давача, не витягуючи зонд з резервуару і, крім того, повернути в будь-яке зручне положення для користувача. Вбудований дисплей відображає такі параметри як: рівень, відстань до поверхні, об'єм, внутрішня температура, амплітуда піку, товщина шару, відсоток діапазону, вихідний струм давача. Живлення приладу поступає по сигнальному контуру (двохпровідному), 11-42 В.

Підключення приладу проводяться двопровідним кабелем. Для установки давача потрібне тільки одна врізання в резервуар.

Температуру в кристалізаторі мірятимемо за допомогою термоперетворювача опору з уніфікованим вихідним сигналом типу *TSMU 0289*, який може застосовуватись для вимірювань у вибухонебезпечних зонах усіх класів. Діапазон вимірювання від  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Клас допуску В, умовний тиск середовища 20 МПа, основна похибка не більше  $\pm 0.7\%$ . Значення температури перетворюється в сигнал постійного струму 4-20 мА.

Ми будемо записувати в якості реєструючої та показуючої апаратури для значень витрат, рівня та температури використовувати 100 мм цифрові самописці фірми Honeywell типу *DPR 100B*. Ця модель представляє собою цифровий багатоканальний самописець з перами, який має модульну будову (модулі встановлюються в головну монтажну панель). Основними функціями гаджета є:

- аналогова шкала з широкою можливістю вибору діапазонів і масштабів;
- ширина діаграми 100мм;
- точність по всій шкалі 0,25%;
- повністю конфігурований універсальний вхід;
- компенсація зрушення пера;
- робоча температура до  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- від 2 до 6 сигналізаційних виходів.

Діаграма самописця документується датою, часом, діапазоном, технологічними одиницями вимірювання, швидкістю руху діаграми, ідентифікатором, точками задання сигналізації та подіями. Самописець має енергонезалежну пам'ять. Швидкість діаграми: від 10 до 1500 мм/год. Прилад має універсальне джерело живлення: від 85 до 264В змінного струму 50/60Гц, 24 або 48В змінного струму/постійного струму.

Блок ручного управління, завдання, індикації *БРУ-10* (фірми МІКРОЛ) може використовуватися в системах автоматизації в якості:

багатофункціональної станції ручного управління аналоговими або імпульсними виконавчими механізмами; блоку ручного задавача аналогового сигналу; блоку ручного задавача імпульсних сигналів "більше"- "менше"; цифрового індикатора двох технологічних параметрів.

Складені вузли БРУ-10:

- панель індикації: 4-х розрядний цифровий і лінійний 21 сегментний індикатор;
- 2 канали вимірювання аналогових величин;
- 2 задавача - аналоговий і імпульсний;
- клавіші управління виконавчими механізмами, задавачами, програмування.

Під час налаштування вибирається один із семи режимів роботи пристрою.

Технічні дані:

- режими роботи ручний-автоматичний, індикація режиму роботи;
- статичне і динамічне балансування;
- сигналізація найменшого і максимального значення на світлодіодних індикаторах, а також фізичного значення (параметр, положення механізму);
- індикація сигналів більше-менше на світлодіодних індикаторах;
- ретрансмісія вхідного сигналу;
- діапазон вимірювання двох аналогових входів і аналогового виходу, а також вихідна точка шкали відкалібровані за допомогою програмного забезпечення;
- програмування методу лінійної індикації: сегмент, гістограма;
- масштабування шкал вимірюваних параметрів в довільних технологічних одиницях;
- вхідний цифровий фільтр аналогових входів;

Технічні характеристики БРУ-10:

- кількість каналів вимірювання: 2;
- вхідні сигнали: 0-5мА ( $R_{вх}=400 \text{ Ом}$ ), 0(4)-20 мА ( $R_{вх}=100 \text{ Ом}$ ), 0-10В ( $R_{вх}>50\text{кОм}$ );

- вихідні аналогові сигнали: 0-5 мА( $R_H=2\text{кОм}$ ), 0-20 мА, 4-20 мА( $R_H=500\text{Ом}$ ), 0-10В( $R_H>2\text{кОм}$ );
- період вимірювання: 0,25 с;
- максимальна похибка встановлення сигналу завдання: 0,1%;
- діапазон зміни установки завдання: 0 - 100%;
- точність індикації: < 0,1% - цифрова < 5,0% (< 2,5%) – лінійна;
- основна приведена похибка вимірювання:  $\pm 0,2\%$ ;
- кількість розрядів цифрового індикатора: 4;
- напруга живлення: від мережі змінного струму  $\sim(220\pm 22)\text{В}$ ,  $(50\pm 1)\text{Гц}$ ;
- температура навколишнього середовища: від  $+5^\circ\text{C}$  до  $+50^\circ\text{C}$ ;
- споживана потужність: не більше 6 Вт.

За допомогою пневматичних регулюючих клапанів із запобіжною функцією типу 241-1 від компанії SAMSON, які використовуються для рідких і газоподібних середовищ, ми зможемо змінювати витрати початкового та маточного розчинів, а також витрати холодоносія. Регулюючий клапан складається з клапану типу 241, пневматичного сервоприводу типу 3277 під інтегроване встановлення і/р позиціонера типу 3767. Допустимий перепад тиску на клапані не більше 1,6 МПа. Температура внутрішнього середовища до  $+350^\circ\text{C}$ . Пневматичний сервопривід тип 3277 є мембранним сервоприводом з тарільчатою мембраною. Нижній мембранний диск жорстко з'єднаний з рамою, на якій розміщений електоро-пневматичний позиціонер типу 3767.

Ми будемо використовувати пневматичний регулюючий клапан від компанії SAMSON із функцією безпеки, модель 3347-7 для зміни витрати вихідної суспензії. Регулюючий клапан складається з клапану типу 3347-7, пневматичного сервоприводу типу 3277 під інтегроване встановлення і/р позиціонера типу 3767. Допустимий перепад тиску на клапані не більше 1,6 МПа. Температурний діапазон від  $-10^\circ\text{C}$  до  $+350^\circ\text{C}$ . Корпус клапана виготовлений з корозестійкої сталі і не має «мертвих» зон на внутрішній поверхні корпуса. Клапан має можливість періодично самоочищатися у трубопроводі.

Для здійснення технологічного захисту (припинення подачі початкового розчину шляхом закриття регулюючого органу на цій лінії) на лінії подачі початкового розчину встановимо швидкодіючий електромагнітний відсічний клапан з дистанційним керуванням типу *КО 500*. Клапан призначений для автоматичного перекриття робочого середовища при порушенні технологічних параметрів в системі. Умовний прохід: 500 мм. Конструктивні розміри клапана: 1110мм x 1220мм.

Для дистанційного керування пуском та зупинкою приводу електродвигунів насосів використовуються контактори типу *КМИ* з електротепловим реле в захисній оболонці. КМИ являється комплексним пристроєм, який складається з малогабаритного контактора КТИ, теплового реле РТИ, оболонки з сальниками і кнопок керування. Номінальний робочий струм 9-95 А. Номінальна робоча напруга 400 В змінного струму. Напруга котушки керування 230 або 400 В змінного струму.

Керування контакторами здійснюється кнопками типу *АРВВ-22N*, які мають світлосигнальну індикацію. Кнопка призначена для оперативного керування контакторами і реле автоматики в електричних колах змінного струму частотою 50 Гц, напругою до 660 В чи постійного струму напругою до 400 В. Кнопка складається з двох вузлів – головки, що швидко знімається, та контактного модуля. Для запобігання потрапляння рідини всередину механізму вона укомплектована гумовими кільцями. Під'єднання провідників до кнопки виконують гвинтовими затискачами з тарільчатими шайбами.

### **2.5.2. Вибір мікропроцесорних засобів автоматизації**

Програмно-технічний компонент - компактний малоканальний мікропроцесорний контролер Реміконт Р-130. Щоб ним користуватися, не потрібно бути досвідченим програмістом. Потрібні алгоритми добуваються з бібліотеки шляхом натискання декількох клавіш. Потім алгоритми об'єднуються в систему заданої конфігурації і в них встановлюються необхідні параметри налаштування.

Максимальна кількість входів/виходів, які може обробляти цей контролер, становить 32 (16 аналогових входів і 4 виходи). Кількість входів/виходів визначається типом ПЗО (пристрою зв'язку з об'єктом). Р-130 має два ПЗО: гр.А і гр.Б.

Реміконт Р-130 - це комплекс технічних засобів. Складається він з окремих конструктивно автономних і функціонально закінчених блоків: центрального блока контролера БК-21 і блоків, що доповнюють центральний блок контролера.

Центральний блок перетворює аналогову і дискретну інформацію в цифрову форму, веде обробку цифрової інформації, виробляє керуючу дію.

Додаткові блоки використовуються для попереднього підсилення сигналів термоелектричних перетворювачів і термоперетворювачів опору, формують дискретні вихідні сигнали для комутації високих напруг, створюють зовнішні переключення і блокування і т. п..

Реміконт Р-130 це проектно-компонований виріб. Його склад, ряд параметрів визначає споживач. В контролер вбудовані засоби самодіагностування, сигналізації і ідентифікації несправностей.

Центральний блок контролер має три моделі: БК - 21 - регулююча; БК - 22 - логічна; БК - 23 - неперервно-дискретна.

В комплекті з Реміконтами можуть використовуватися звичайні давачі і виконавчі механізми, яки підключаються до Реміконтів за допомогою індивідуальних кабельних з'єднань.

Без додаткових пристроїв Реміконт Р-130 (як однакові, так і різні моделі контролерів) можуть об'єднуватися в локальну керуючу мережу Транзит кільцевої конфігурації за допомогою інтерфейсного каналу послідовного зв'язку. По витій парі дротів контролери можуть обмінюватися інформацією в цифровій формі. З зовнішнім абонентом мережа Транзит може взаємодіяти за допомогою шлюзу, який входить в склад Реміконт Р-130.

Регулююча модель БК-21 реалізує такі функції:

1. ручне встановлення або автоматична корекція параметрів налаштування алгоритмів керування;
2. безударна зміна режимів керування (завдання автоматично встановлюється рівним значенню вхідного сигналу, потім плавно завдання міняється до заданого значення);
3. безударне ввімкнення/вимкнення, перемикання і конфігурація контурів регулювання (змінні, що не зображаються на панелі, блокуються);
4. вибіркоче операторне керування і контроль за контурами регулювання за допомогою 12-ти клавіш і двох чотирьохрозрядних індикаторів;
5. запис алгоритмів користувача в перепрограмований ПЗП (постійний запам'ятовуючий пристрій) з можливістю ультрафіолетового стирання;
6. самодіагностика та індикація несправностей.

Структурну схему Р-130 можна зобразити наступним чином (рис. 2.5):

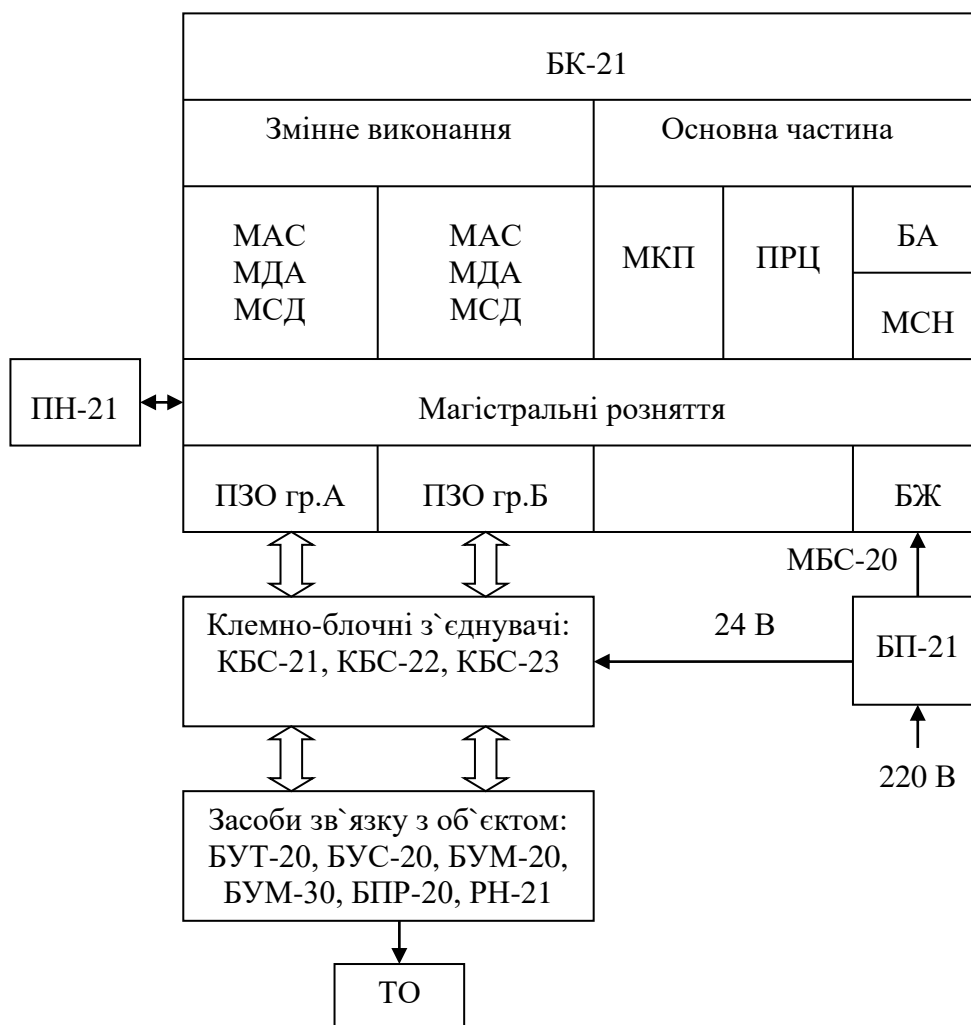


Рис. 2.5. Структурна схема Р-130

ПРЦ – модуль процесора, що напряду зв'язаний з акумуляторною батареєю БА для підтримки оперативної пам'яті;

МКП – модуль контролю і програмування;

МСН – модуль стабілізованої напруги, що забезпечує живленням контролер і пульт налагодження ПН-21;

БЖ – блок живлення;

МАС – модуль аналогових сигналів;

МДА – модуль аналогових та дискретних сигналів;

МСД – модуль дискретних сигналів;

ТО – технологічний об'єкт.

### Функціональні можливості РЕМІКОНТа Р - 130

У мікропроцесорних контролерах є базова концепція віртуальної структури. Вона дозволяє абстрагувати від поняття фізичної структури. Вона описує інформаційну організацію контролера і представляє властивості контролера як ланки системи керування. В Реміконті Р-130 частина віртуальної структури реалізована апаратно, а частина - програмно.

Віртуальна структура контролера містить:

1. алгоблоки;
2. бібліотеку алгоритмів;
3. засоби інтерфейсного каналу;
4. засоби настройки і контролю;
5. засоби вводу-виводу інформації.

### Алгоблоки

Алгоблок є базовим елементом віртуальної структури Реміконтів. Алгоблок - пустий (тобто без алгоритму), ніяких функцій по обробці сигналів контролер не виконує. Контролер запрацює тільки тоді, коли в алгоблок в процесі технологічного програмування буде записаний який-небудь алгоритм з бібліотеки алгоритмів. В кожний алгоблок можна внести тільки один алгоритм з бібліотеки алгоритмів, яка відноситься до даної моделі контролера.

### Бібліотека алгоритмів



Бібліотека алгоритмів - це перелік алгоритмів керування, які в процесі настройки контролера заносяться в алгоблоки. Алгоритми дозволяють вирішувати задачі автоматичного регулювання, задачі логіко-програмного керування, виконують статичні, математичні, логічні і аналого-дискретні перетворення сигналів.

Алгоритм складається з функціонального ядра і має свої входи і виходи. Алгоритм має дві групи входів: сигнальні, які виконують функцію алгоритма, і настроювальні, які керують параметрами настройки. Ці входи - рівноправні, т.б. мають однакові можливості конфігурування. Вихід - це результат обробки вхідних сигналів. Кожний вид алгоритму може мати свою кількість входів і виходів, але максимальне число входів - 99, а виходів - 24. Входи, як сигнальні, так і настроювальні мають нумерацію від 01 до 99, а виходи від 01 до 24.

Входи алгоритму можуть бути явними (ті які довільно конфігуруються) і деякі алгоритми (алгоритми вводу-виводу, приймання-передачі, оперативного керування) мають неявні входи-виходи (спеціального призначення, які не конфігуруються, а автоматично з'єднуються з апаратурою, яку має обслуговувати даний алгоритм).

Кожний алгоритм має свій бібліотечний номер, під яким він зберігається в бібліотеці. Алгоритм викликається з бібліотеки за двохзначним десятковим кодом. Алгоблок з алгоритмом під кодом 00 не має входів виходів, не виконує деякої роботи і не впливає на роботу алгоблоків, але в ОЗП займає місце і вимагає невеликого часу на обслуговування.

Алгоритм може мати модифікатор, який задає додаткові властивості алгоритму. Модифікатор задає число однотипних операцій, які виконує один алгоритм. Може задавати набір певних параметрів. Деякі алгоритми модифікатора не мають.

Ті алгоритми, робота яких зв'язана з часом, мають масштаб часу (регулювання, програмований задавач, таймер і т.п.). І модифікатор, і масштаб часу розширюють можливості алгоритмів. Деякі алгоритми з однаковим

номером , але розміщені в різні алгоблоки можуть мати свій модифікатор і масштаб часу.

В довільний алгоблок можна розмістити довільний алгоритм, якій входить в бібліотеку алгоритмів. Алгоритм можна використовувати багаторазово, тобто помістити його в декілька алгоблоків. Алгоритми ОКО і ОКЛ розміщуються лише в перші чотири алгоблоки.

Вся бібліотека алгоритмів розділена на 9 груп.

Алгоритми лицьової панелі, включають 4 алгоритма;

Алгоритми вводу-виводу, включають 13 алгоритмів;

Алгоритми регулювання, включають 9 алгоритмів;

Динамічні перетворення, включають 7 алгоритмів;

Статичні перетворення, включають 14 алгоритмів;

Аналогово-дискретні перетворення, включають 11 алгоритмів;

Логічні операції, включає 10 алгоритмів;

Дискретне керування, включає 13 алгоритмів;

Групове неперервно-дискретне керування, включає 6 алгоритмів.

При конфігурації Реміонта Р-130 вибирається алгоблок. Для його входів призначаються джерела сигналів (лише явні входи, неявні входи мають постійну приписку і не конфігуруються). Сигнальні і настроювальні входи конфігуруються однаково.

На основі розробленої функціональної схеми автоматизації процесу кристалізації та вибраних первинних перетворювачів вибираємо регулюючу модель мікропроцесорного контролера РЕМІКОНТ Р-130 типу БК-21-11. Тобто, ПЗО гр.А і ПЗО гр.Б контролера є 1-го типу (модуль аналогових сигналів МАС - має 8 аналогових входів і 2 аналогових виходи).

## **2.6. Програмне забезпечення системи керування**

Від вимірювальних перетворювачів аналогові сигнали витрати початкового розчину, температури кристалізації та рівня в кристалізаторі поступають на вхід алгоритму ВАА. ВАА (07) – вхід аналоговий гр.А;

застосовується для зв'язку функціональних алгоритмів з аналоговими засобами вводу (АЦП). Може обслуговувати до 8 аналогових входів та дозволяє коректувати аналоговий сигнал в точках 0 і 100 %.

Програма функціонування контролера Р-130 повинна реалізовувати наступні контури:

1. Контур регулювання витрати початкового розчину. Для реалізації цього контуру застосуємо алгоритм регулювання РАН. РАН (20) – регулювання аналогове, застосовується для побудови ПД-регулятора, який працює з лінійним виконавчим механізмом. Крім цього, в алгоритмі обчислюється та фільтрується сигнал розузгодження, вводиться зона нечутливості. Алгоритм має два виходи: основний вихід алгоритму  $Y$  та відфільтрований сигнал розузгодження  $Y_{\epsilon}$ . На вхід  $X_2$  алгоритму РАН поступає вихідний сигнал  $Y_1$  алгоритму ВАА (оброблений сигнал витрати початкового розчину), на вхід  $X_1$  – сигнал завдання  $Y_{\text{ЗДН}}$  алгоритму ЗДН. ЗДН (24) – алгоритм завдання, який застосовується для формування сигналу ручного завдання в контурі регулювання. З його допомогою здійснюється під'єднання програмних задавачів і сигналу від зовнішнього задавача. Значення модифікатора алгоритму залежить від кількості приєднаних програмних задавачів (00 – ручний задавач).

Основний вихід  $Y$  алгоритму РАН поступає на вхід алгоритму РУЧ. РУЧ (26) – ручний режим; застосовується разом з алгоритмом ОКО і дозволяє переводити контур регулювання в ручний режим керування. Також через цей алгоритм здійснюється дистанційне керування.

Вихідний сигнал алгоритму РУЧ поступає на вхід  $X_1$  алгоритму АВА. АВА (11) - аналоговий вихід гр.А.; застосовується для зв'язку функціональних алгоритмів із засобами апаратного виводу сигналів (ЦАП). В цьому алгоритмі передбачена можливість корекції нуля та кінця діапазону. Кількість вихідних сигналів визначається модифікатором. Вихідний сигнал алгоритму АВА прямує на електро-пневмопозиціонер типу 3767 регулюючого клапана SAMSON 241-1 з пневматичним сервоприводом типу 3277.

Вихідний сигнал  $Y_1$  алгоритму ВАА, сигнал завдання  $Y_{зДН}$  алгоритму ЗДН, вихідний сигнал алгоритму РУЧ та сигнал розузгодження  $Y_{\varepsilon}$  поступають на входи  $X_{ВХ}$ ,  $X_{зДН}$ ,  $X_{руч}$  та  $X_{\varepsilon}$  алгоритму ОКО відповідно. ОКО (01) – оперативний контроль керування. Застосовується в тому випадку, якщо є необхідність керування контурами регулювання з передньої панелі контролера. Він може бути застосований лише 4 рази, при чому кількість його застосувань залежить від кількості реалізованих контурів регулювання. Алгоритм завжди записується в перших 4 алгоблоки і номер алгоблоку буде визначати номер контуру регулювання. Алгоритм реалізує зв'язок віртуальної структури контролера з місцевою панеллю та її елементами. ОКО має 16 модифікаторів, які визначаються типом регулятора, типом вихідного сигналу, наявністю зовнішнього завдання та наявністю дистанційного керування.

2. Контур регулювання, сигналізації та захисту температури кристалізації. Регулювання в цьому контурі здійснюється аналогічно до попереднього контуру, але вихідний сигнал алгоритму РУЧ поступає на вхід  $X_2$  алгоритму АВА.

Для реалізації контурів захисту та сигналізації верхньої допустимої межі відхилення температури вихідний сигнал  $Y_2$  алгоритму ВАА (оброблений сигнал температури) подається на вхід  $X_{1,1}$  алгоритму НОР. НОР (60) – нуль-орган; застосовується для контролю за сигналом або різницею двох сигналів за допомогою обмеження сигналів «справа» та «зліва». Алгоритм складається з декількох однакових ланок, кількість яких залежить від модифікатора (максимальна кількість 10).

Вихідний сигнал алгоритму НОР поступає на вхід алгоритму ІНВ. ІНВ (06) – інтерфейсний вивід; застосовується для передачі будь-яких сигналів через канал інтерфейсу. Алгоритм може передавати до 30 аналогових чи дискретних сигналів. Кількість сигналів задається модифікатором.

3. Контур регулювання рівня в кристалізаторі. Регулювання в цьому контурі здійснюється аналогічно до попереднього контуру, але вихідний сигнал

алгоритму РУЧ поступає на вхід  $X_1$  алгоритму АВБ.АВБ (12) – аналоговий вихід гр.Б.

4. Контур сигналізації режимів роботи насосу маточного розчину. Для реалізації контуру сигналізації режимів роботи насосу (Вкл./Відкл.) вихідний сигнал  $Y_4$  алгоритму ВАА (оброблений сигнал від кнопки керування насосом) подається на вхід  $X_{1,2}$  алгоритму НОР. А вихідні сигнали алгоритму НОР поступають на вхід алгоритму ІНВ.

5. Контур сигналізації режимів роботи насосу вихідної суспензії. Цей контур реалізується аналогічно до попереднього, вихідний сигнал  $Y_5$  алгоритму ВАА (оброблений сигнал від кнопки керування насосом) подається на вхід  $X_{1,3}$  алгоритму НОР. А вихідні сигнали алгоритму НОР поступають на вхід алгоритму ІНВ.

### 3. ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ

#### 3.1. Складання математичної моделі об'єкта регулювання і розрахунок її параметрів

Математичну модель об'єкта регулювання для розрахунків оптимальних параметрів настройки регулятора знаходимо у вигляді функції передачі.

Вхідною величиною даного об'єкта регулювання (кристалізатора) є витрата холодоносія, а вихідною – температура кристалізації.

Враховуючи структурну схему взаємозв'язків між технологічними параметрами об'єкта, матеріальний баланс, експериментальні дані та інформацію з навчальної літератури побудуємо математичну модель кристалізатора у вигляді функції передачі. Її можна представити як послідовне з'єднання трьох аперіодичних ланок, тобто обрана модель матиме вигляд:

$$W(p) = \frac{k}{(Tp + 1)^3},$$

де  $T$  – стала часу аперіодичної ланки;

$k$  – коефіцієнт передачі.

На основі аналітичних залежностей для визначення параметрів математичної моделі та знаючи геометричні розміри об'єкта, значення технологічних параметрів об'єкта, матеріальні та енергетичні потоки визначимо основні параметри математичної моделі об'єкта:

- коефіцієнт передачі приймемо рівним  $0.7 \text{ } ^\circ\text{C}$ :

$$k = 0.7 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

- стала часу аперіодичних ланок:

$$T_i = 33 \left( \frac{\text{м}^3}{\text{год}} \right),$$

Отже, функція передачі буде наступною:

$$W(p) = \frac{0.7}{(33p + 1)^3}.$$

Крива розгону кристалізатора при одиничному стрибкоподібному збуренні має вигляд, показаний на рис. 3.1.

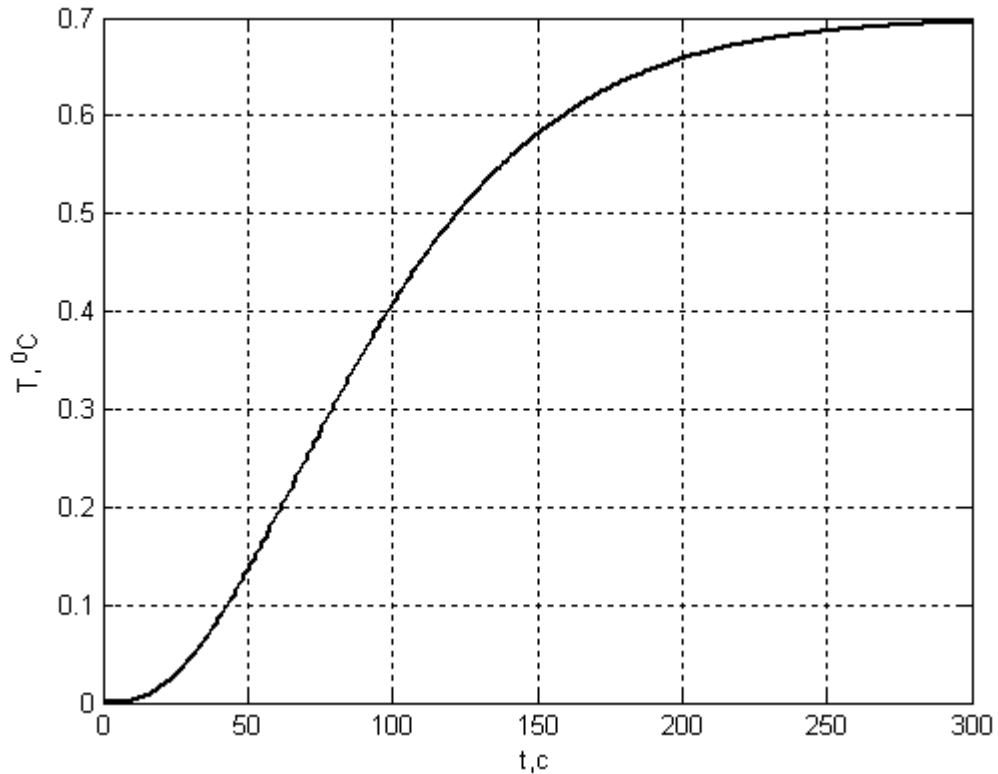


Рис.3.1. Крива розгону кристалізатора при одиничному стрибкоподібному збуренні

При зміні витрати холодоносія температура кристалізації змінюється і досягає нового усталеного значення, так як кристалізатор є об'єктом регулювання з самовирівнюванням. Закон зміни температури в часі при нанесенні збурення характеризує динамічні властивості кристалізатора. Динамічні властивості кристалізатора залежать, головним чином, від його конструктивних розмірів і витрати холодоносія. Чим більший об'єм кристалізатора і чим менша витрата холодоносія, тим гірші його динамічні властивості.

### **3.2. Вибір і обґрунтування вимог до перехідного процесу контуру регулювання**

Будь-яка САР крім стійкості повинна забезпечувати якісні показники процесу регулювання. Якість процесу регулювання для стабілізуючих САР зазвичай оцінюють по перехідній функції по відношенню до одиничного

стрибкоподібного збурення, а для слідкуючих САР – по перехідній функції по відношенню до одиничного стрибкоподібного задаючого впливу.

Основними показниками якості є: час регулювання, перерегулювання, коливальність і похибка регулювання.

Крім цього, слід відмітити, що в конкретних умовах до якості регулювання можуть висуватися й інші вимоги, наприклад, максимальна швидкість зміни значення величини, яка регулюється, основна частота її коливань і т. д.

Часом регулювання називається час, на протязі якого, починаючи з моменту нанесення збурення на систему, відхилення значень величини, яка регулюється, від її сталого значення буде менше наперед заданого значення. Таким чином, час регулювання визначає тривалість перехідного процесу.

*Перерегулювання* - це максимальне відхилення значення величини, що регулюється, від значення яке встановилося, виражене у відсотках.

*Колівальність* системи характеризується числом коливань величини, яка регулюється, за час регулювання.

*Точність регулювання* визначається як різниця між значенням регульованої величини, яке встановилось після закінчення перехідного процесу, і її заданим значенням.

В даній роботі якість регулювання оцінюється за допомогою таких критеріїв:

1. Час регулювання  $t_p$ .
2. Максимальне динамічне відхилення  $A_{\max}$  – максимальна амплітуда перехідного процесу.
3. Коефіцієнт зникання коливань  $\psi$  – відношення різниці двох сусідніх амплітуд одного знаку кривої перехідного процесу до найбільшої з них

$$: \psi = \frac{A_1 - A_2}{A_1} .$$

4. Точність регулювання  $\Delta$ .
5. Виходячи з технологічних умов час регулювання для такого об'єкту приймають рівним  $t_p=300$  с. Максимальне динамічне відхилення  $A_1=1$



°C. Коефіцієнт зникання коливань  $\psi = 0.8$ . Точність регулювання  $\Delta = 0.05$  °C. Ступінь коливальності  $m = 0.34$ .

### 3.3. Визначення закону регулювання

В практиці автоматизації використовуються регулятори, які формують пропорційний (П), пропорційно-інтегральний (ПІ), пропорційно-диференціальний (ПД) і пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) – закони регулювання. П- і ПД-регулятори використовуються в САР з астатичними об'єктами, а ПІ- та ПІД-регулятори – в САР з статичними об'єктами, оскільки наявність інтегруючих ланок в складі вказаних регуляторів та в астатичному об'єкті призводить до нестійкої роботи системи регулювання.

П–регулятори використовуються для регулювання об'єктів, де є допустимою зміна параметру, який регулюється, в деякому діапазоні при зміні навантаження обладнання. Зміна параметру, який регулюється,  $\Delta x_{рп}$  в таких САР називаються залишковою нерівномірністю регулювання, а відношення її до зміни навантаження обладнання  $\Delta G$ , або відповідній зміні положення виконавчого механізму  $\Delta x_{вм}$  – ступенем залишкової нерівномірності регулювання:

$$\delta = \frac{\Delta X_{\partial i}}{\Delta G};$$

$$\delta' = \frac{\Delta X_{\partial i}}{X_{\partial i}};$$

Ступінь залишкової нерівномірності  $\delta'$  обернено пропорційний коефіцієнту підсилення П-регулятора. Чим більший коефіцієнт підсилення регулятора  $k_p$ , тим менша нерівномірність регулювання (статична похибка регулювання). Пропорційні регулятори є найбільш простими і дозволяють стійко регулювати промислові об'єкти регулювання. Основним недоліком таких регуляторів є залишкова нерівномірність регулювання.

Функція передачі П -регулятора:  $W(p) = k_p$ .

I-регулятори є регуляторами непрямої дії обернених зв'язків. I-регулятори можуть стійко працювати тільки з об'єктами із значним самовирівнюванням.

$$\text{Функція передачі має вигляд: } W(p) = \frac{1}{T_i p}.$$

ПІ-регулятор в динамічному відношенні подібний до системи з двох паралельно увімкнених ланок: П-ланки з коефіцієнтом передачі  $k_p$  та І-ланки. Функція передачі ПІ-регулятора визначається за формулою:

$$W(p) = k_p \left( 1 + \frac{1}{T_i p} \right).$$

При збільшенні часу іздрому до безмежно великого ПІ-регулятор перетворюється в П-регулятор. Якщо  $k_p$  та  $T_i$  прямують до нуля, але при цьому їх відношення залишається постійним, то одержимо І-регулятор.

ПІ-регулятори відрізняються простотою конструкції і дозволяють стійко без залишкової нерівномірності регулювати велику кількість промислових об'єктів. Тому вони отримали велике поширення на практиці.

ПІД-регулятори в динамічному відношенні схожі до систем з трьох послідовно з'єднаних ланок: пропорційної, інтегральної та ідеальної диференційної.

Функція передачі ПІД-регулятора має вигляд:

$$W(p) = k_p \left( 1 + \frac{1}{T_i p} + T_d p \right).$$

Для даного процесу доцільно використати одноконтурну САР температури кристалізації з функцією передачі об'єкт регулювання

$W(p) = \frac{0.7}{(33p+1)^3}$  у прямому зв'язку і з автоматичним ПІД-регулятором у зворотному зв'язку. Така структура забезпечує якісне регулювання температури за рахунок швидкої реакції регулятора на всі типи збурень, які надходять в об'єкт регулювання.

### 3.4. Розрахунок оптимальних настроювальних параметрів регулятора

Значення параметрів настроювання регулятора наближено можуть бути знайдені за спрощеною методикою, яка ґрунтується на припущенні про можливість описання об'єктів регулювання через функції передачі типу: аперіодична ланка першого порядку, інтегруюча ланка, диференційна ланка, ланка запізнення та інші. Зрозуміло, що ця методика не може бути застосована для об'єктів, які не описуються функціями передачі цих ланок. Тому для знаходження оптимальних значень параметрів настроювання регулятора необхідно застосувати спеціально розроблені теоретично обґрунтовані методи: метод розширених частотних характеристик, метод розрахунку параметрів за показником коливальності  $M$ . Для розрахунку САР, яка знаходиться під дією випадкових процесів, застосовують дисперсійний метод.

Розрахунок оптимальних параметрів настроювання за методом розширених частотних характеристик базується на амплітудо-фазовому критерії стійкості, який можна інтерпретувати як критерій запасу стійкості, якщо замість звичайних частотних характеристик застосувати розширені частотні характеристики.

Розширена частотна характеристика елемента з відомою функцією передачі визначаються заміною в ній оператора Лапласа

$$p = -mw \pm iw,$$

де  $w$  – кругова частота;  $m = \alpha / w$  - степінь коливальності, який характеризує запас стійкості;  $\alpha$  – абсолютне значення дійсної частини комплексного кореня характеристичного рівняння.

Умова забезпечення заданого запасу стійкості формулюється на основі амплітудно-фазового критерію стійкості Найквіста, в якому застосовуються розширені частотні характеристики розімкнутої системи автоматичного регулювання

$$W_{pc}(m, iw) = W_{op}(m, iw)W_p(m, iw) = -1 \quad (3.1)$$

де  $W_{op}(m, i\omega)$  - розширена амплітудно-фазова характеристика (АФХ) об'єкта регулювання,  $W_p(m, i\omega)$  - розширена АФХ регулятора. Для спрощення запису позначимо  $U(m, \omega) = U$ ,  $V(m, \omega) = V$ .

*Розрахунок параметрів настроювання ПІД-регулятора.*

В якості регулятора вибираю ПІД-регулятор. Розширена амплітудно-фазова характеристика (АФХ) ПІ-регулятора записується у вигляді

$$W_p(m, i\omega) = \kappa_p + \frac{\kappa_p}{T_{i3}} \frac{1}{(-m\omega \pm i\omega)}. \quad (3.2)$$

Підставляючи (3.2) в (3.1) одержимо

$$(U + iV) \left[ \kappa_p + \frac{\kappa_p}{T_{i3}} \frac{1}{(-m\omega + i\omega)} \right] = -1,$$

або

$$-m\omega U \kappa_p + i\omega \kappa_p U - im\omega V \kappa_p - \omega \kappa_p V + U \frac{\kappa_p}{T_{i3}} + iV \frac{\kappa_p}{T_{i3}} - m\omega + i\omega = 0,$$

звідки отримуємо систему двох рівнянь з двома невідомими  $\kappa_p$  і  $\frac{\kappa_p}{T_{i3}}$

$$\begin{cases} U \frac{\kappa_p}{T_{i3}} - \omega(mU + V)\kappa_p - m\omega = 0 \\ V \frac{\kappa_p}{T_{i3}} - \omega(U - mV)\kappa_p - \omega = 0 \end{cases}.$$

Розв'яжемо отриману систему рівнянь відносно  $\kappa_p$  і  $\frac{\kappa_p}{T_{i3}}$

$$\begin{cases} \frac{\kappa_p}{T_{i3}} = -\omega(m^2 + 1) \frac{V}{U^2 + V^2} \\ \kappa_p = -\frac{U + mV}{U^2 + V^2} \end{cases}. \quad (3.3)$$

Розширена АФХ об'єкта регулювання в показниковій формі має вигляд  $W_{op}(m, i\omega) = A_{op}(m, \omega) e^{i\varphi_{op}(m, \omega)} = A_{op}(m, \omega) \cos \varphi_{op}(m, \omega) + iA_{op}(m, \omega) \sin \varphi_{op}(m, \omega)$ , де  $A_{op}(m, \omega)$ ,  $\varphi_{op}(m, \omega)$  – розширені амплітудно- і фазочастотні характеристики об'єкта регулювання. Враховуючи, що дійсна  $U$  і уявна  $V$  розширені частотні

характеристики

визначаються

як

$$U = A_{op}(m, \omega) \cos \varphi_{op}(m, \omega), \quad V = A_{op}(m, \omega) \sin \varphi_{op}(m, \omega) \quad \text{система (3.3) набуде}$$

вигляду

$$\begin{cases} \frac{k_p}{T_{i3}} = -\frac{\omega(m^2 + 1) \sin \varphi_{op}(m, \omega)}{A_{op}(m, \omega)} \\ k_p = \frac{-\cos \varphi_{op}(m, \omega) - m \sin \varphi_{op}(m, \omega)}{A_{op}(m, \omega)} \end{cases} \quad (3.4)$$

Змінюючи частоту в діапазоні  $\omega^* \leq \omega \leq \omega^{**}$  ( $\omega^*$  - частота, що відповідає параметру настроювання І-регулятора;  $\omega^{**}$  - частота, що відповідає параметру настроювання П-регулятора) розраховують область параметрів настроювання ПІ-регулятора на задану ступінь коливальності  $m_{зад}$ . Аналітично частоти  $\omega^*$  і  $\omega^{**}$  можна визначити з рівнянь

$$\varphi_{op}(m, \omega^*) = -\frac{\pi}{2} + \arctg m; \quad \varphi_{op}(m, \omega^{**}) = -\pi.$$

Графічно границя області заданого запасу стійкості представлена на рис.3.2.

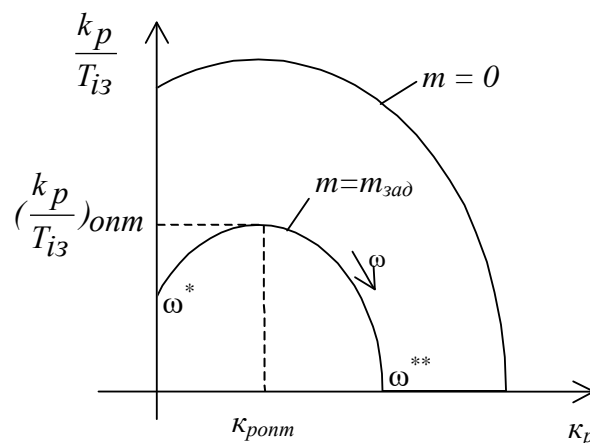


Рис.3.2. Границя області заданого запасу

На цьому ж графіку показана область параметрів настроювання регулятора, що виводять САР на границю стійкості ( $m=0$ ). Якщо вважати, що діючі в САР збурення є низькочастотними (зокрема детерміноване збурення у вигляді стрибка є низькочастотним), то оптимальні параметри настроювання

розраховують при частоті  $\omega_0$ , при якій  $\frac{k_p}{T_{i3}} = (\frac{k_p}{T_{i3}})_{max}$ . Для випадкових збурень вибирають параметри настроювання з границі області запасу стійкості на робочій частоті  $\omega_p = 1.2\omega_0$ . Вважається, що таким чином визначені параметри, наближено забезпечують мінімальне значення інтегральної квадратичної оцінки якості  $J_2$

$$J_2 = \int_0^t [y(t) - y_{зад}(t)]^2 dt \quad (3.5)$$

де  $y(t)$  - крива розгону замкненої САР;  $y_{зад}$  - задане значення регульованої величини.

Для точного визначення оптимальних параметрів настроювання регулятора необхідно розрахувати значення  $J_2$  за рівнянням (3.5) при різних значеннях параметрів настроювання регулятора зі знайденої області заданого запасу стійкості, і знайти таку пару значень  $k_{popt}, (\frac{k_p}{T_{i3}})_{opt}$ , при якій  $J_2$  набуде найменшого значення. Таким чином, оптимальними параметрами настроювання регулятора є такі, що при заданому запасі стійкості САР забезпечують мінімальне значення інтегральної оцінки якості.

За розширеними частотними характеристиками знаходимо частоти  $\omega^*$  і  $\omega^{**}$ , які відповідають параметрам настроювання І- та ІІ-регуляторів відповідно.

*Програма pi\_wgraf.m для знаходження значень  $\omega^*$  та  $\omega^{**}$ :*

```
m=0.34;
w=[0.0001:0.01:1.57];
p=-m*w+i*w;
W1=0.7./(33.*p+1);
W2=1./(33.*p+1);
W3=1./(33.*p+1)
W=W1.*W2.*W3;
fi=phase(W);
```

```

l1=-pi/2+atan(m);
l2=-pi;
plot(w,fi,w,l1,w,l2); grid; xlabel('w, rad/sec');
ylabel('y, rad');

```

Результатом виконання програми є графік, наведений на рис. 3.3.

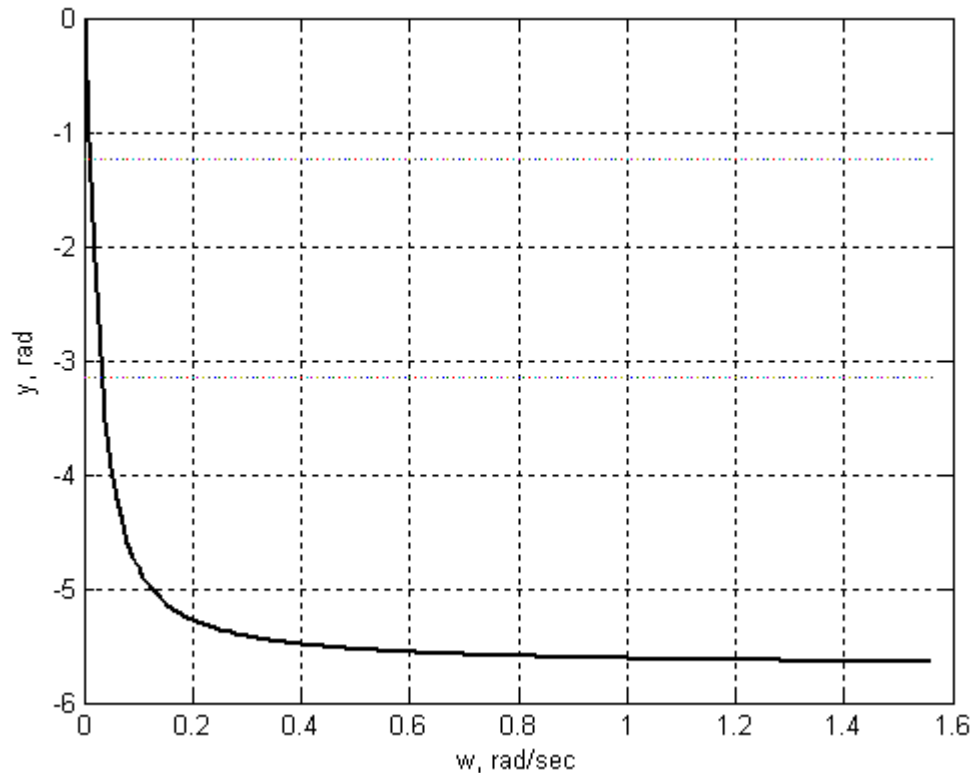


Рис. 3.3. Розширена фазочастотна характеристика кристалізатора

З графіка визначено  $\omega^* = 0.0117 \left( \frac{\text{rad}}{\text{c}} \right)$ ,  $\omega^{**} = 0.0334 \left( \frac{\text{rad}}{\text{c}} \right)$ .

Для побудови границі області заданого запасу стійкості була написана програма **zap\_st.m**:

```

Td=25; m=0.34;
w1=0.0117; w2=0.0334;
w=[w1:0.001:w2];
p=-m*w+i*w;
W1=0.7./(33.*p+1);
W2=1./(33.*p+1);
W3=1./(33.*p+1)

```

```

W=W1.*W2.*W3;
A=abs(W); fi=phase(W);
ga=abs(fi)+atan(m)-pi;
Kp_Tiz=w.*sqrt(m.^2+1).*(m.*
    cos(ga)-sin(ga))./A+w.^2.*(1+m.^2)*Td;
Kp=sqrt(m.^2+1).*cos(ga)./A+2*Td*m.*w;
[Kp_Tiz_rozr,s]=max(Kp_Tiz),
Kp_rozr=Kp(s),
figure(1);plot(Kp,Kp_Tiz);xlabel('kp');ylabel('kp/Tiz, c^-1');
title('Granucja zapasy stijkosti');grid;
Tiz=Kp_rozr/Kp_Tiz_rozr;
ym=Td/Tiz,

```

Результатом виконання даної програми є визначення границі області заданого запасу стійкості, що наведені на рис. 3.4:

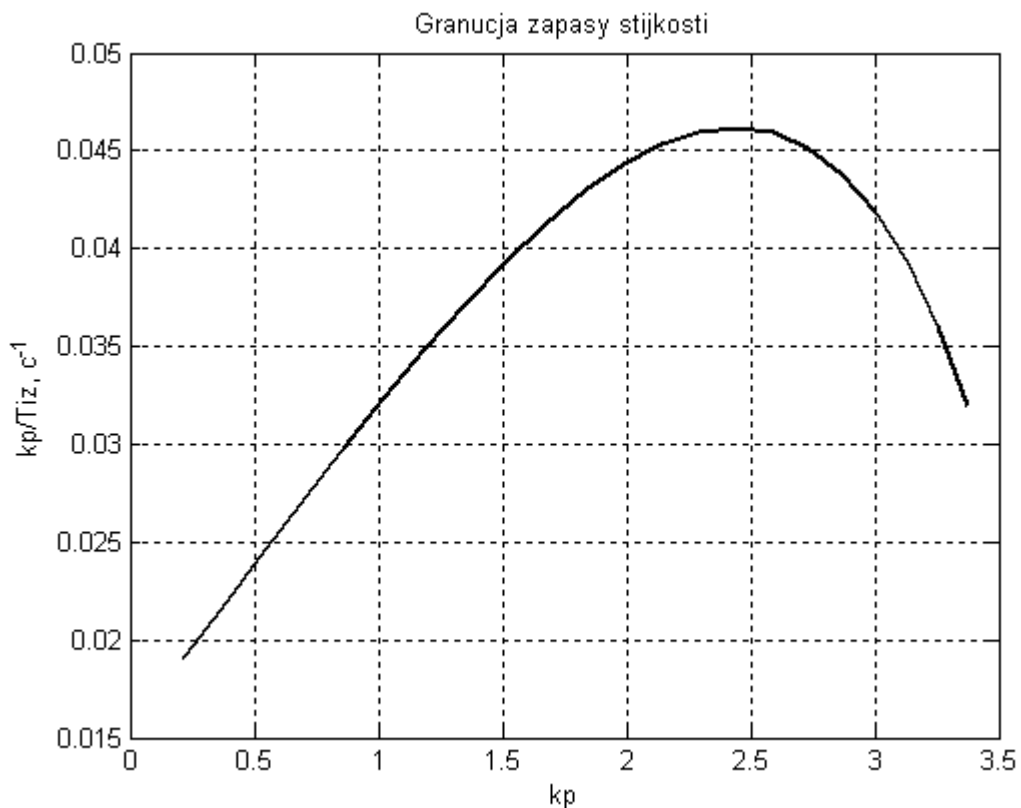


Рис. 3.4. Границя області заданого запасу стійкості

Оптимальні параметри настроювання вибираємо в точці, де  $Kp/Tiz$  є максимальним. Отже параметри настроювання ПІД-регулятора наступні:



$K_p=2.4453$ ;  $K_p/T_{iz} = 0.0462$ ;  $T_d=25$ .

Перевіримо виконання умови

$$0 \leq \frac{T_d}{T_{iz}} \leq 0.5$$

$$0 < 0.4725 < 0.5$$

Отже, умова виконується. Функція передачі ПІД-регулятора матиме вигляд:

$$W_p(p) = 2.4453 + \frac{0.0462}{p} + 25p$$

Отже, маючи настройки ПІД-регулятора, можемо побудувати перехідний процес.

### 3.5. Побудова перехідного процесу розрахованої САР

Перехідний процес САР будемо на основі знайдених параметрів функції передачі об'єкту регулювання та ПІД-регулятора за допомогою математичного пакету MATLAB. На рис.3.5. приведена структурна схема регулювання температури кристалізації, реалізована в середовищі SIMULINK пакету MATLAB.

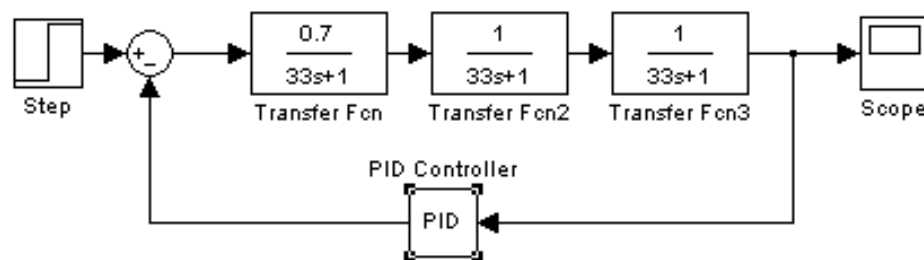


Рис. 3.5. Структурна схема регулювання температури, реалізована в середовищі SIMULINK.

Змодельємо перехідний процес з ПІД-регулятором у САР. Його зображено на рис. 5.6. Як видно із рис. 5.6, максимальне динамічне відхилення  $A_{\max} = 0.25 \text{ } ^\circ\text{C}$ , час регулювання становить  $t_p = 280 \text{ c}$ , статична похибка  $\Delta_{\text{стан}} = 0 \text{ мм}$ , коефіцієнт зникання коливань  $\psi = 0.9$ . Отриманий перехідний процес задовільняє вимоги до якості процесу регулювання.

Згідно з вимогами з технологічних умов час регулювання для такого об'єкту не повинен перевищувати  $t_p=300$  с. Максимальне динамічне відхилення  $A_1=1$  °С. Коефіцієнт зникання коливань  $\psi =0.8$ . Точність регулювання  $\Delta=0.05$  °С. Ступінь коливальності  $m = 0.34$ .

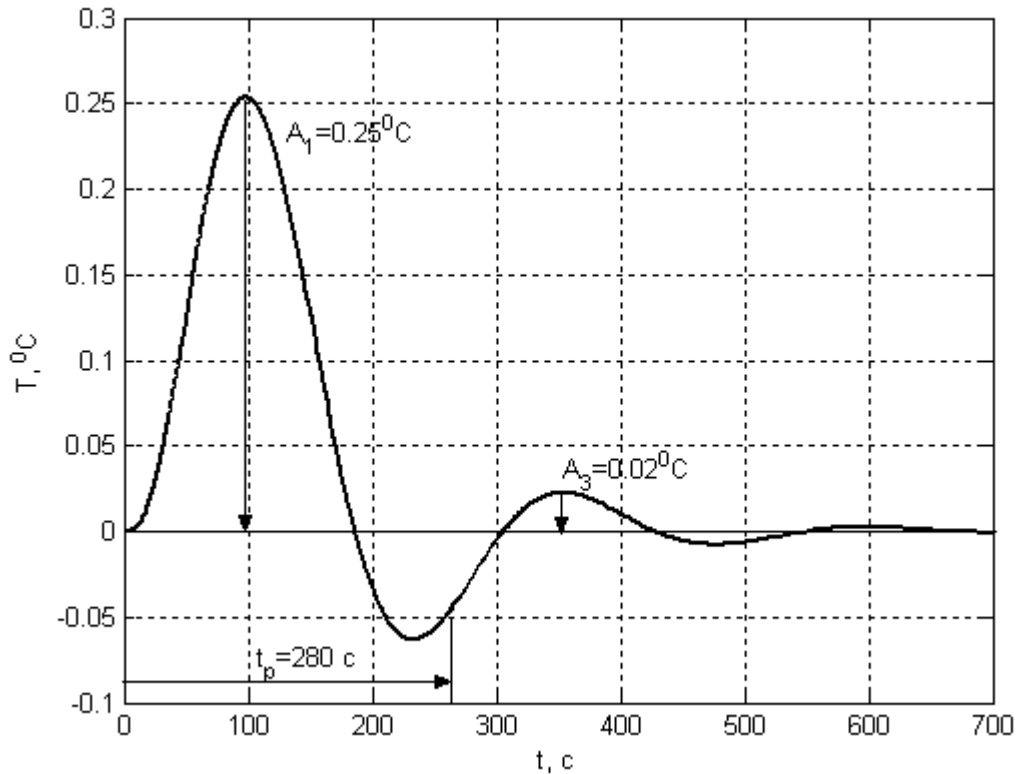


Рис. 3.6. Перехідний процес у САР із ПІД-регулятором

Порівнюючи отримані результати з вимогами, що регламентуються технологічним процесом, робимо висновок, що ПІД-регулятор із розрахованими параметрами настроювання:  $K_p=2.4453$ ;  $K_p/T_i z =0.0462$ ;  $T_d=25$  і функцією передачі

$$W_p(p) = 2.4453 + \frac{0.0462}{p} + 25p$$

забезпечує вимоги до процесу регулювання.

### 3.6. Опис функціональної схеми автоматизації

Опис контурів системи автоматизації процесу кристалізації наведено нижче.

1. Регулювання витрати початкового розчину. Як первинний перетворювач використовується давач витрати SITRANS F M MAGFLO типу MAG 3100 (поз. 1-1), вихідний сигнал якого поступає на перетворювач MAG 5000 (поз.1-2). В цій системі вимірювання витрати застосовується магнітно-індуктивний принцип вимірювання з пульсуючим постійним полем. Значення витрати виводиться на чотирьохканальний вторинний реєструючий прилад типу DPR 100В (поз.4-3). Сигнал з вимірювального перетворювача MAG 5000 (поз.1-2) 4-20 мА через ПЗО гр.А поступає на регулюючий блок БК-21-11 контролера РЕМІКОНТ Р-130, де відповідно до розробленої програми функціонування здійснюється аналогове регулювання витрати початкового розчину. Вихідний сигнал регулятора 4-20 мА через ПЗО гр.А надходить на вхід блоку ручного керування БРУ-10 (поз. 1-3). Для зміни ступеню відкриття регулюючого органу на лінії подачі початкового розчину використаємо регулюючий клапан типу SAMSON 241-1 з пневматичним сервоприводом типу 3277 (поз.1-4). При відхиленні параметра від заданого значення ( $50 \text{ м}^3/\text{год}$ ) регулятор подає сигнал на електро-пневмопозиціонер типу 3767 регулюючого клапана SAMSON 241-1 з пневматичним сервоприводом типу 3277. Клапан встановлюється на лінії подачі початкового розчину.

2. Регулювання та сигналізація температури в кристалізаторі. Первинний перетворювач – термоперетворювач опору з уніфікованим вихідним сигналом 4-20 мА типу ТСМУ 0289 (поз. 2-1). Цей сигнал через блок перетворення сигналів від термоперетворювачів опору БУС-20 контролера РЕМІКОНТ Р-130 та ПЗО гр.А поступає на регулюючий блок БК-21-11 контролера РЕМІКОНТ Р-130, де відповідно до розробленої програми функціонування здійснюється аналогове регулювання температури в кристалізаторі. Вихідний сигнал регулятора 4-20 мА через ПЗО гр.А надходить на вхід блоку ручного керування БРУ-10 (поз. 2-4). Для зміни ступеню відкриття регулюючого органу на лінії подачі холодоносія використаємо

регулюючий клапан типу SAMSON 241-1 з пневматичним сервоприводом типу 3277 (поз.2-5). При відхиленні параметра від заданого значення (45 °С) регулятор подає сигнал на електро-пневмопозиціонер типу 3767 регулюючого клапана SAMSON 241-1 з пневматичним сервоприводом типу 3277. Клапан встановлюється на лінії подачі холодоносія.

За допомогою мікропроцесорного пристрою, відповідно до розробленої програми функціонування, при відхиленні температури від заданого значення здійснюється сигналізація верхнього рівня та захист.

При перевищенні гранично допустимого значення сигнал температури поступає через ПЗО гр.Б і блок перемикаючих реле БПР-20 на лампове табло сигналізації та через ПЗО гр.Б і блок підсилення потужності дискретних вихідних сигналів БУМ-20 на швидкодіючий електромагнітний відсічний клапан (поз. 2-6), перекриваючи потік початкового розчину.

Вихідний сигнал блоку БУС-20 (значення температури) виводиться на двоканальний вторинний реєструючий прилад типу DPR 100В (поз.2-2).

3. Регулювання рівня в апараті. Як первинний перетворювач використовується зонд (поз. 3-1), що входить до складу давача рівня Rosemount 3302, вихідний сигнал якого 4-20 мА. До складу цього давача входить також корпус електроніки з вбудованим дисплеєм (поз. 3-2), який здійснює покази рівня по місцю. Сигнал від давача сприймається двоканальним вторинним реєструючим приладом типу DPR 100В (поз. 2-2) та через ПЗО гр.А поступає на регулюючий блок БК-21-11 контролера РЕМІКОНТ Р-130, де відповідно до розробленої програми функціонування здійснюється аналогове регулювання рівня. Далі вихідний сигнал через ПЗО гр.Б надходить на блок ручного керування БРУ-10 (поз. 3-3). При відхиленні параметра від заданого значення (4 м) контролер подає сигнал на електро-пневмопозиціонер типу 3767 регулюючого клапана SAMSON 3347-7 з пневматичним сервоприводом типу 3277 (поз.4-5). Клапан встановлюється на лінії суспензії.

4. Контроль витрати холодоносія. Як первинний перетворювач використовується давач витрати SITRANS F M MAGFLO типу MAG 3100 (поз.

4-1), вихідний сигнал якого поступає на перетворювач MAG 5000 (поз.4-2), який здійснює покази витрати по місцю. В цій системі вимірювання витрати застосовується магнітно-індуктивний принцип вимірювання з пульсуючим постійним полем. Після перетворювача сигнал витрати заводиться на чотирьохканальний вторинний реєструючий прилад типу DPR 100В (поз.4-3)..

5. Контроль витрати маточного розчину. Цей контур аналогічний до контура 4.

6. Контроль витрати суспензії. Цей контур аналогічний до контура 4.

7. Керування насосом маточного розчину. Для дистанційного керування пуском та зупинкою приводу електродвигуна насосу використовується контактор типу КМИ з електротепловим реле в захисній оболонці (поз. 7-1). Керування контактором здійснюється кнопкою типу АРВВ-22N (поз. 7-2), вихідний сигнал якої через ПЗО гр.А поступає на регулюючий блок БК-21-11 контролера РЕМІКОНТ Р-130, де відповідно до розробленої програми функціонування здійснюється сигналізація режиму роботи насоса (Вкл./Відкл). При цьому сигнал через ПЗО гр.Б і блок перемикаючих реле БПР-20 поступає на лампове табло сигналізації.

8. Керування насосом вихідної суспензії. Цей контур аналогічний до контура 7 на схемі автоматизації.

### 3.7. Специфікація на засоби автоматизації

Специфікація на засоби автоматизації наведена в табл.3.1.

Таблиця 3.1.

#### Специфікація на засоби автоматизації

№ п/п	№ позиції	Назва параметра	Номінальне значення параметра	Назва засобу та коротка технічна характеристика	Тип	Кількість
1	1-1, 4-1, 5-1, 6-1	Витрата	50м <sup>3</sup> /год для ПР; 30м <sup>3</sup> /год для ХН; 30м <sup>3</sup> /год для МР; 20м <sup>3</sup> /год для ВС.	Давач витрати. Максимальний тиск: 425 бар. Робоча температура: -40-100°С. Похибка вимірювання 0,5%.	SITRANS F M MAGFLO MAG 3100	4
2	1-2, 4-2, 5-2, 6-2			Перетворювач сигналу витрати. Максимальна похибка вимірювання складає 0,5% від виміряної величини	MAG 5000	4

				витрати. Вихідні сигнали:1 струмовий (0(4)-20 мА), 1 релейний,1 цифровий. Живлення: 11-24 В постійного/змінного струму, 115-230 В змінного струму.		
3	2-2, 4-3	Витрата, температура, рівень		Цифровий багато-канальний стріч-ковий самописець фірми Honeywell. Ширина діаграми: 100мм. Точність по всій шкалі: 0,25%. Аналогова шкала з діапазоном від 0 до 2м. Швидкість діаграми: від 10 до 1500мм/год. Живлення: 85 - 264В змінного струму 50/60Гц.	DPR 100B	2
4	1-3; 2-4, 3-3			Блок ручного управління, завдання та індикації. Вхідні сигнали: 0-5мА (Rвх=400 Ом), 0(4)-20мА (Rвх=100Ом), 0-10В (Rвх>50кОм).Вихідні аналогові сигнали: 0-5 мА (Rн2кОм), 0-20мА, 4-20мА(Rн500Ом), 0-10В (Rн>2кОм). Максимальна похибка установки сигналу завдання:±0,1%. Діапазон зміни установки завдання:0-100%. Напруга живлення: від мережі змінного струму ~(220±22) В,(50±1)Гц.	БРУ-10	3
5	1-4; 2-5			Пневматичний регулюючий клапан з функцією безпеки. Складається з клапану типу 241, пневматичного сервоприводу типу 3277 з і/р позиціонером типу 3767. Допустимий перепад тиску не більше 1,6 МПа. Температура внутрішнього середовища до +350 °С.	SAMSON 241-1	2
6	2-1	Температура	45 °С.	Термоперетворювач опору з уніфікованим вихідним сигналом. Діапазон вимірювання від -25°С до 125°С.Клас допуску В, основна похибка±0.7%. Вихідний сигнал постійного струму 4-20 мА.	ТСМУ 0289	1
7	2-6			Швидкодіючий електромагнітний відсічний клапан з дистанційним керу-	КО 500	1

				ванням. Умовний прохід: 500 мм. Конструктивні розміри клапана: 1110мм x 1220мм.		
8	3-1, 3-2	Рівень	4 м	Хвилевий радарний давач рівня. Діа-пазон вимірювання від 0,1 до 20 м. Вихідний сигнал 4-20 мА постійного струму. Похибка зміни рівня: +5мм (для зонду ≤ 5м). Оновлення показів: 1 раз/с.	Rosemount 3302	1
9	3-5			Пневматичний ре-гулюючий клапан з функцією безпеки. Складається з кла-пану типу 3347-7, пневматичного сервоприводу типу 3277 з і/р позиціонером типу 3767. Допустимий перепад тиску не більше 1,6 МПа. Температурний діапазон від -10 °С до +350 °С.	SAMSON 3347-7	1
10	7-1; 8-1			Контактор для дистанційного керування пуском та зупинкою приводу електродвигуна на-сосу. Номінальний ро-бочий струм 9-95А. Номінальна робоча напруга 400В змінного струму. Напруга катуш-ки керування 230 або 400 В змінного струму.	КМИ	2
11	7-2; 8-2			Кнопка керування контактором. Має світло-сигнальну індикацію. Номінальна робоча на-пруга 24-400В постійного струму, 48-660 В змінного струму.	APBB-22N	2

## 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

### 4.1. Аналіз стану виробничої санітарії і гігієни праці

Для надійного функціонування охорони праці необхідно правильно визначити:

- параметри процесу, за якими потрібно проводити захист, блокування і сигналізацію;
- фактори, які можуть призвести до виникнення небезпечних ситуацій;
- небезпеки, які можуть призвести до виникнення аварії або бути її наслідком;

Створенням, налагодженням і монтажем систем автоматизації на підприємстві займається відділ КВП і А, який складається з двох підрозділів: операторів і слюсарів-ремонтників.

При проведенні технологічного процесу, а також роботі в операторному приміщенні можна виділити наступні можливі види небезпек:

- 1) для слюсарів-ремонтників КВП і А:
  - пожежо- та вибухонебезпека (при аваріях в пічних агрегатах, трубопроводах подачі газу);
  - можливість отримання опіків;
  - негативний вплив підвищення рівнів шуму та вібрацій (при роботі різних видів конвеєрів);
  - отруєння шкідливими речовинами;
  - ураження електричним струмом;
  - небезпеки, пов'язані з можливістю травмування робітників відкритими та рухомими частинами обладнання;
  - небезпеки, пов'язані з роботою на висоті;
  - небезпеки, пов'язані з незадовільними метеорологічними умовами.
- 2) для операторів КВП і А:
  - зорове перенапруження;
  - небезпеки, пов'язані з низькою рухливістю;



- небезпеки, пов'язані з незадовільними ергономічними і метеорологічними умовами;
- пожежо- та вибухонебезпечні умови.

Для зменшення ризиків виникнення нещасних випадків в дипломному проекті необхідно передбачити заходи з охорони праці.

#### **4.2. Обґрунтування організаційно-технічних рекомендацій з охорони праці**

Згідно статті 13 закону України про охорону праці «Управління охороною праці та обов'язки роботодавця», третього розділу «Організація охорони праці», роботодавець зобов'язаний створити на робочому місці в кожному структурному підрозділі умови праці відповідно до нормативно-правових актів, а також забезпечити додержання вимог законодавства щодо прав працівників у галузі охорони праці.

Згідно статті 6 закону України про охорону праці «Права працівників на охорону праці під час роботи», другого розділу «Гарантії прав на охорону праці», умови праці на робочому місці, безпека технологічних процесів, машин, механізмів, устаткування та інших засобів виробництва, стан засобів колективного та індивідуального захисту, що використовуються працівником, а також санітарно-побутові умови повинні відповідати вимогам законодавства.

Відповідно до статті 8 закону України про охорону праці «Забезпечення працівників спецодягом, іншими засобами індивідуального захисту, мийними та знешкджувальними засобами» на роботах із шкідливими і небезпечними умовами праці, а також роботах, пов'язаних із забрудненням або несприятливими метеорологічними умовами, працівникам видаються безоплатно за встановленими нормами спеціальний одяг, спеціальне взуття та інші засоби індивідуального захисту, а також мийні та знешкджувальні засоби.

Нормативним документом, що визначає параметри мікроклімату виробничих приміщень є ГОСТ 12.1.005-88 «Система стандартів безпеки праці. Загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони». Норми

виробничого мікроклімату регламентують державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень ДСН 3.3.6-042-99.

Показниками, що характеризують мікроклімат є температура повітря; відносна вологість повітря; швидкість руху повітря та теплове навантаження.

Оптимальними вважаються такі умови праці, при яких буде найвища працездатність і хороше самопочуття.

Приміщення повинні бути достатньо освітлені, вдень – як найбільше природним світлом, а в нічний та в вечірній часи електричним освітленням. Освітленість повинна відповідати нормативним значенням за ДБН В 2.5-28-2006 «Природне і штучне освітлення».

Згідно ГОСТ 12.4.021-75 (вентиляція, загальні вимоги) та СНіП 2.04.05-91 (вентиляція та конденсація повітря) вентиляційна система повинна відповідати передбаченим нормативам, створювати на робочих місцях нормальні метеорологічні умови і чистоту повітряного середовища, що відповідає діючим санітарним нормам.

Електробезпека на виробництві забезпечується відповідною конструкцією електроустановок; застосуванням технічних засобів і засобів захисту; організаційними та технічними заходами згідно до ГОСТ 12.1.009-76.

Граничні величини шуму на робочих місцях регламентуються ГОСТ 12.1.003-83 «Система стандартів безпеки праці. Шум. Загальні вимоги безпеки».

Рівень вібрації на виробництві повинен відповідати ГОСТ 12.1.012-91.

Пожежобезпека повинна відповідати стандарту ГОСТ 12.1.004-91. У комплексі заходів, спрямованих на ліквідацію пожежі, що використовується у системі протипожежного захисту, важливе значення має вибір найраціональніших способів та засобів припинення горіння згідно зі ДБН В 2.5-13-98 «Пожежна автоматика будинків і споруд». Однією з умов успішного використання вогнегасників є виконання правил розміщення вогнегасників на об'єкті.

Усі працівники, які приймаються на постійну чи тимчасову роботу і при подальшій роботі, повинні проходити на підприємстві навчання в формі інструктажів з питань охорони праці, подання першої допомоги потерпілим від нещасних випадків, а також з правил поведінки та дій при виникненні аварійних ситуацій, пожеж і стихійних лих. Керівники підприємств в свою чергу зобов'язані забезпечити своєчасне і якісне проведення інструктажу робітників по безпечним прийомам і методам роботи, які регулярно проводяться на всіх підприємствах незалежно від ступеня небезпеки підприємств. Після навчання весь персонал повинен здати іспити по техніці безпеки.

### *Вентиляція та опалення*

Необхідно, щоб повітря робочої зони виробничих приміщень відповідало вимогам ДСН 3.3.6.042-99 і ГОСТ 12.1.005-88.

Під час перевищення у приміщеннях норм концентрації шкідливих газів і пилу, що передбачаються санітарними нормами, необхідно негайно вивести людей в безпечну зону та вжити заходів щодо ліквідації загазованості та запиленості повітря.

Для локалізації пиловиділень необхідно передбачати герметизацію та аспірацію устаткування, застосування зволоження, сигналізацію про заповнення бункерів, регулярне прибирання приміщень.

Всмоктуючі та видувні отвори вентиляторів повинні бути загороджені решітками.

Відбір зовнішнього повітря не повинен виконуватись на висоті менше ніж 2 м від землі і в місцях, забруднених різними шкідливими речовинами.

Для опалення приміщень повинні бути передбачені системи, теплоносії і пристрої, які не створюють додаткових виробничих шкідливих факторів.

Системи опалення будинків і споруд підприємства необхідно вибирати з урахуванням вимог ДСП 173-96 і СНиП 2.04.05-91.

Температура повітря в приміщеннях в холодну пору року не повинна бути нижче 14°C при легкій фізичній роботі, 12°C при роботі середньої важкості і 8°C при важкій роботі.

### *Вібрації та шум*

Рівні вібрації та шуму, що впливають на працівників, повинні відповідати вимогам Санітарних норм виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку ДСН 3.3.6.037-99, Державних санітарних норм виробничої загальної та локальної вібрації, затверджених постановою головного державного санітарного лікаря України.

Вентилятори, повітродувки, рівні шуму яких перевищують допустимі норми, необхідно розташовувати у звукоізолювальних камерах або у звукоізолювальних кожухах (укриттях), обладнувати глушниками шуму з боку всмоктування та нагнітання, а також засобами віброізоляції, що запобігають передачі вібрацій трубопроводам і фундаментам.

Технологічне устаткування, що має шумові характеристики, які перевищують гранично допустимі норми, необхідно оснащувати засобами зниження шуму або розміщувати у звукоізолювальних боксах, або ж ізолювати звукоізолювальними перегородками або екранами.

Для усунення шкідливого впливу на працівників підвищеного рівня шуму повинні застосовуватись засоби індивідуального захисту.

### *Освітлення*

Робоче освітлення повинно забезпечувати на робочих поверхнях освітленість і яскравість відповідно до вимог ДБН В.2.5-28-2006 «Інженерне обладнання будинків і споруд» та ДБН В.2.5-28-2006 «Природне і штучне освітлення», затверджених наказом Міністерства будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства України від. Джерела живлення аварійного освітлення повинні відповідати вимогам чинних нормативно-правових актів.

Улаштування, монтаж і експлуатація силового та освітлювального устаткування необхідно провадити з дотриманням вимог НПАОП 40.1-1.21-98, НПАОП 40.1-1.32-01 та інших чинних нормативно-правових актів.

Показники освітлення території підприємства, допоміжних приміщень і робочих місць у цехах повинні відповідати встановленим нормам. У структурних підрозділах підприємства необхідно застосовувати робоче, аварійне та евакуаційне освітлення.

Робоче освітлення повинно забезпечувати освітленість і яскравість на робочих поверхнях не нижче нормативної.

Аварійним освітленням необхідно забезпечувати на робочих поверхнях освітленість не менше 5% від нормативної, установленної для цих поверхонь.

Евакуаційне освітлення повинно забезпечувати освітленість на підлозі основних шляхів пересування працівників, на сходах сходів не менше 3 лк (люксів).

Світильники повинні відповідати вимогам НПАОП 40.1-1.32-01 і розміщуватися таким чином, щоб забезпечити надійність їх кріплення, безпеку та зручність обслуговування.

Миття вікон повинне проводитись не рідше ніж 4 рази в рік.

#### *Ергономічні вимоги*

Ергономічні вимоги до робочих місць під час виконання робіт у сидячому положенні повинні відповідати вимогам чинних нормативних документів.

На постійному робочому місці оператора за пультом або щитом повинні бути регульовані крісла з підлокітниками, з опорою для спини та з підставкою для ніг.

#### *Заходи безпеки*

У приміщеннях з підвищеним забрудненням пилом електропроводка та електропускові пристрої необхідно виконувати таким чином, щоб забезпечувалася можливість вологого прибирання приміщень. В електромашинних приміщеннях необхідно передбачати прибирання пилу з електроустаткування пилососом.

На роботах, що пов'язані з небезпекою ураження електричним струмом, повинні застосовуватися засоби захисту відповідно до вимог НПАОП 40.1-1.21-98, Правил безпечної експлуатації електроустановок, Правил експлуатації електрозахисних засобів, НПАОП 40.1-1.07-01.

Органи керування на пульті та на щиті повинні розташовуватись в послідовності запуску і зупинки обладнання.

Кнопки запуску повинні бути втоплені на 3-5 мм за габарити пускової коробки, а кнопки зупинки повинні бути червоного кольору і виступати на 3 мм.

Органи керування на пульті або на щиті повинні розташовуватись на відстані не більше ніж 800 мм від вертикальної осі сидіння.

Електричні прилади та щити необхідно заземлювати відповідно до вимог чинних нормативно-правових актів.

Контрольно-вимірювальні прилади повинні освітлюватися відповідно до норм освітленості.

Стан і робота приладів, засобів автоматизації, сигналізації, дистанційного керування та пристроїв захисних блокувань повинні постійно контролюватися.

Регулювання та ремонт приладів і засобів автоматизації повинні виконувати тільки працівники служби контрольно-вимірювальних приладів і засобів автоматизації.

На всіх засобах вимірювання, що контролюють граничні значення параметрів технологічного процесу, червоною фарбою повинні помічатися гранично допустимі значення параметра, що вимірюється.

Засоби зв'язку та сигналізації необхідно розташовувати в зонах максимальної видимості та чутності працівників, а також робити їх легкодоступними та безпечними під час обслуговування.

Устаткування перед пуском у роботу необхідно перевіряти на його безпечність під час роботи на ньому, наявності та цілісності огорож, надійності дії пускових і гальмівних пристроїв, заземлення, справності запобіжних кожухів, справності ізоляції, сигналізації пуску та зупинки, автоблокування.

У разі виявлення несправностей або недоліків у забезпеченні безпечної експлуатації устаткування робота на ньому повинна бути негайно припинена.

Органи аварійного виключення (кнопки, важелі) повинні бути червоного кольору, мати покажчики їхнього розташування, написи про призначення. Символи органів керування повинні відповідати вимогам державних стандартів «Органи керування виробничим устаткуванням. Позначення» та «Органи керування виробничим устаткуванням. Загальні вимоги безпеки».

#### *Загальні вимоги до технологічного обладнання*

Технологічне обладнання необхідно розташовувати в окремому приміщенні та відділяти від інших ділянок цеху капітальними стінами.

Відстань між габаритами обладнання повинно бути не менше 3 м, а між стіною та обладнанням - не менше ніж 1,2 м.

Перед пуском обладнання необхідно переконатися в надійності та справності огорож, надійності кріплення футерувальних плит і кришок люків бункера для борошна, готовності до роботи дозаторів води і дріжджового розчину,

Для проведення ремонтних робіт, підйому кришок люків в приміщенні цеху мають бути встановлені вантажопідйомні машини.

### **4.3. Пожежна безпека**

На основі проведеного аналізу на підприємстві розробляється система заходів щодо попередження пожежі та протипожежного захисту технологічних процесів згідно з вимогами нормативних документів.

Технічні рішення системи запобігання пожежі.

Проектом передбачене наступне:

- всі елементи, які можуть у процесі роботи іскритися, встановлюються у вогнетривких шафах. Застосовуються іскрогасящі діоди;
- кабелі прокладаються на відстані 1 м від нагрітих поверхонь або захищаються екранами з неспалених матеріалів. Всі елементи кабельного господарства прокладаються в коробах, захисних трубах;

- при аварійних ситуаціях передбачене використання аварійного захисту, що відключає встаткування;
- для захисту від короткого замикання застосовуються плавкі запобіжники й автоматичні вимикачі;
- для запобігання згоряння всі деталі й елементи виготовляються з неспалених і важко спалених матеріалів (в основному металеві конструкції).

Технічні рішення системи протипожежного захисту. Для виявлення початкової стадії пожежі, повідомлення про місце його виникнення й включення установок пожежогасіння відповідно до проекту застосовують наступні установки пожежної сигналізації на базі автоматичних пожежних оповіщувачів.

Установка електричної пожежної сигналізації відповідно складається з оповіщувачів - датчиків (у даному проекті - датчик комбінованого типу КМ-1, що реагує на дим і підвищення температури), встановлених у приміщеннях, що захищають, ліній зв'язку й прийомної станції СДПУ-1 з живленням від мережі змінного струму 220В встановлюваний у приміщенні щитової. У випадку виникнення пожежі за допомогою світлових і звукових сигналів буде вироблятися оповіщення обслуговуючого персоналу й пожежної команди.

Приміщення обладнане первинними засобами пожежогасіння - вогнегасником 2БР2МА (вуглекислотний). При пожежі в електроустановках, які перебувають під напругою.

Для гасіння пожеж використається вода. Приміщення обладнане протипожежним водопроводом.



## **5. РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЕКТОВАНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ**

### **5.1. Техніко-економічне обґрунтування запроєктованого варіанту системи автоматизації технологічного процесу кристалізації адипінової кислоти**

Підвищення економічної ефективності господарювання вимагає проведення таких техніко-економічних заходів:

- підвищення якості продукції з одночасним зменшенням її собівартості і витрат на виробництво;
- введення нових прогресивних технологій, які б дозволяли знизити витрати матеріальних, сировинних та енергетичних ресурсів, підвищити продуктивність обладнання і технологічних ліній. Більш повно використовувати потужність підприємства, а як наслідок – підвищити обсяг виходу готової продукції;
- покращення системи обліку та стандартизації готової продукції, сировини, напівфабрикатів, енергії, тощо;
- покращення системи взаєморозрахунків, що дозволило б прискорити обіг оборотних коштів;
- покращення умов роботи працівників;
- проведення заходів з автоматизації і механізації виробництва, що дозволить досягнути неперервності процесів виробництва, зменшити частку ручної праці, зменшити кількість браку;
- проведення робіт за напрямками науково-технічного розвитку і технічного переобладнання підприємства.

Проведення великої кількості операцій із застосуванням ручної праці зумовлює зниження якості продукції і наявність браку. Тому поряд із заміною обладнання доцільно здійснити заміну старої системи автоматизації, яка була побудована на локальних регулюючих і контролюючих засобах, на нову систему з використанням сучасної мікропроцесорної техніки. Хоча нові мікропроцесорні засоби є дорогими, але завдяки їх багатофункціональному

призначенню є можливість виключити проміжні прилади та здійснювати різні додаткові операції.

Запроектвану систему можна віднести до взаємопов'язаної автоматизації закінчених технологічних процесів без перегляду технології.

Для техніко-економічного обґрунтування вибраної системи автоматизації використаємо дані підприємства, наведені в табл. 5.1.

Таблиця 5.1

### Вихідні дані для порівняння варіантів

Показники	Умовне познач.	Одиниця вимірюв.	Варіант	
			базовий	запроектов.
Річна програма випуску продукції	Q	т	5380,6	5649,6
Термін використання КВП і А	T <sub>вик</sub>	років	5	5
Кількість відмов КВП і А	N <sub>над</sub>	%	3	0,5
Похибка КВП і А	P <sub>пох</sub>	%	2,5	0,5
Чисельність робітників основних допоміжних	Ч <sub>осн</sub>	людей	48	24
	Ч <sub>доп</sub>	людей	28	34
Вартість системи автомазації	K <sub>0</sub>	грн	94193,58	139161,87
Собівартість продукції	C	грн/т	469,54	465,48
Сума приведених затрат	K <sub>пр</sub>	грн/т	474,49	470,18

### 5.2. Економічна ефективність автоматизації виробничих процесів

Введення нової системи автоматизації з використанням сучасної мікропроцесорної техніки дозволить зменшити собівартість продукції за рахунок наступних факторів:

- зменшення витрат сировини і матеріалів – введення в процес відповідних регуляторів дозволить більш точно проводити дозування сировини, а як наслідок буде підвищуватися якість продукції і її вихід;
- зменшення браку відходів;

- зменшення витрат палива – введення регулятора співвідношення витрат „паливо-повітря” з корекцією за концентрацією кисню в димових газах дозволить оптимізувати витрату палива;
- збільшення продуктивності обладнання і процесу в цілому за рахунок зменшення використання ручної праці і досягнення більшої неперервності процесу;
- зменшення кількості обслуговуючого персоналу.

### 5.2.1. Розрахунок капітальних затрат на автоматизацію

Одноразові капітальні витрати включають в себе вартість контрольно-вимірювальних і регулюючих приладів та засобів автоматизації, монтажних, будівельних і налагоджувальних робіт, втрати від ліквідації звільненої техніки.

Згідно заводських даних вартість виробів, апаратів, засобів автоматизації і приладів складає 109741,63 грн. транспортно-заготівельні витрати враховуються в розмірі 8 % від купівельної ціни засобів автоматизації і складають 8779,33 грн.

Витрати на монтаж системи автоматизації визначаються вартістю матеріалів, які витрачаються при проведенні монтажних робіт і витратами, пов'язаними з заробітною платою робітників. Згідно заводських даних витрати на монтаж системи автоматизації складають 2154,5 грн.

Вартість налагодження апаратури згідно даних підприємства складає 10 % купівельної вартості засобів автоматизації і становить 10974,16 грн.

Вартість будівельних робіт  $\Pi_6$ , пов'язаних з реконструкцією приміщень і влаштуванням фундаментів під щити, визначають за залежністю:

$$\Pi_6 = V \cdot \Pi_v \left( 1 + \frac{C}{100} \right), \text{ де}$$

$V$  – об'єм будівлі, який підлягає реконструкції; за проектом  $V=25 \text{ м}^3$ ;  $\Pi_v$  – ціна за  $1 \text{ м}^3$  об'єму приміщення, що підлягає реконструкції; за даними підприємства  $\Pi_v = 195$  грн;  $C$  – витрати на роботи по опаленню, освітленню, каналізації. За даними підприємства ці витрати складають 10 %. Тоді вартість будівельних робіт рівна:  $\Pi_6 = 25 \times 195 (1 + 0,1) = 5362,5$  грн.

Витрати на санітарно-технічні роботи згідно даних підприємства становить 20 % вартості будівельних робіт і складають 1072,5 грн.

Витрати на демонтаж існуючої системи автоматизації згідно даних заводу є рівними 50 % вартості монтажних робіт і чисельно складають 1077,25 грн.

Загальні капітальні витрати на впровадження запроєктованої системи автоматизації технологічного процесу випікання хлібопродуктів складуть:

$$\begin{aligned} Ц &= 109741,63 + 8779,33 + 2154,5 + 10974,16 + 5362,5 + 1072,5 + 1077,25 = \\ &= 139161,87 \text{ грн.} \end{aligned}$$

Затрати на амортизацію становлять 25% від вартості засобів автоматизації

$$V_{\text{аморт}} = 109741,63 \times 0,25 = 27435,4 \text{ грн в рік.}$$

Затрати на планові ремонти обладнання закладені у розмірі:

$$V_{\text{пл,рем}} = 6500 \text{ грн}$$

Отже, експлуатаційні витрати на автоматизацію котлоагрегатів становлять :

$$V = 27435,4 + 6500 = 33935,4 \text{ грн.}$$

### 5.3. Розрахунок виробничої потужності після автоматизації

Одним з показників за рахунок збільшення якого може бути оптимальний прибуток, є виробнича потужність.

Річну виробничу потужність обладнання неперервної дії можна визначити за формулою:

$$V = N \cdot n_r \cdot (T - T_0), \text{ де}$$

$N$  – кількість однорідних апаратів;  $n_r$  – продуктивність одиниці обладнання за годину;  $T_0$  – регламентовані зупинки одного апарата, годин;  $T$  – календарний час, годин.

Проведемо розрахунок виробничої потужності з використанням даних заводу і паспортних даних обладнання. Порівняно з базовим варіантом виробнича потужність зростає на 5 % за рахунок таких факторів:

- досягнення неперервності технологічного процесу;
- виключення використання ручної праці;

- зменшення часу регламентованих зупинок на ремонт за рахунок блочного принципу виконання приладів;
- підвищення продуктивності обладнання за рахунок перших двох факторів, а також за рахунок повного використання сировини і матеріалів;
- підвищення коефіцієнта виходу готової продукції;
- зменшення витратних коефіцієнтів сировини.

#### 5.4. Розрахунок собівартості річного випуску продукції

Для проведення розрахунків собівартість запроєктованого і базового варіантів повинна визначатися за єдиною методикою при однакових цінах на сировину, матеріали, електроенергію, рівних обсягах виробництва. Тому з врахуванням різниці в річному випуску продукції розраховують додаткові капітальні вкладення з допомогою показника питомих капітальних вкладень за формулою:

$$K_d = \left( \frac{K_2}{Q_2} - \frac{K_1}{Q_1} \right) \cdot Q_2, \text{ де}$$

$K_1, K_2$  – капітальні вкладення відповідно в базовий і запроєктований варіанти;  
 $Q_1, Q_2$  – річний випуск продукції відповідно в базовому і запроєктованому варіанті.

$$K_d = \left( \frac{13916187}{5649,6} - \frac{94193,58}{5380,6} \right) \cdot 5649,6 = 40258,21 \text{ грн.}$$

Економію за рахунок зниження витрат сировини і матеріалів розрахуємо за даними підприємства за формулою:

$$E_m = (V_1 \Pi_1 - V_2 \Pi_2) Q_2, \text{ де}$$

$V_1, V_2$  – обсяг сировини, матеріалів, які витрачаються на виробництво одиниці продукції відповідно до і після введення нової системи автоматизації;  $\Pi_1, \Pi_2$  – відповідно ціна одиниці сировини, матеріалів.

Загальна економія за рахунок зниження витрат сировини і матеріалів складе:

$$E_3 = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 = 103747,69 \text{ грн.}$$

Зміни у витратах на електроенергію розраховуються за даними підприємства за формулою:

$$E_e = (m_1 - m_2) \cdot C_2 \cdot Q_2, \text{ де}$$

$m_1, m_2$  – витрати електроенергії на одиницю продукції відповідно до і після введення нової системи автоматизації;  $C_2$  – ціна одиниці енергії.

Тоді за даними підприємства

$$E_e = (0,018 - 0,0229) \cdot 5649,6 = -129,19 \text{ грн.}$$

Тобто, додаткові витрати на електроенергію складуть 129,19 грн. Необхідно зауважити, що витрати електроенергії зростають не за рахунок збільшення енергоємності обладнання, а із-за суттєвого розширення його бази.

Економію по заробітній платі робітників визначають у відповідності зі зміною чисельності основних і допоміжних робітників і їх середньорічної заробітної плати.

Визначимо явочну чисельність чергових слюсарів після введення нової системи автоматизації за формулою:

$$Ч_{\text{ячсл}} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i \cdot t_i \cdot K_3}{\Phi_{\text{ч}}}, \text{ де}$$

$N_i$  – кількість приладів даного типу, що підлягають обслуговуванню;  $t_i$  – норма часу на обслуговування одного приладу (приймається згідно даних підприємства);  $\Phi_{\text{ч}}$  – тривалість робочої зміни (480 хвилин);  $K_3$  – коефіцієнт запасу, який враховує виконання незапланованих робіт ( $K_3 = 1,1$ ).

Явочна чисельність чергових слюсарів буде рівною:

$$Ч_{\text{ячсл}} = \frac{(15 \cdot 15 + 23 \cdot 10 + 20 \cdot 1 + 120 \cdot 5) \cdot 1,1}{480} = 2,46 \text{ чоловік}$$

Приймаємо явочну чисельність чергових слюсарів рівною 3. Тоді явочна чисельність чергових слюсарів за добу є рівною 9. Спискова чисельність чергових слюсарів є рівною 12.

За заводським розрахунком явочна чисельність слюсарів КВП і А є рівною 15 чоловік на добу. Спискова чисельність складає 24 робітники.

Для проведення розрахунку річного фонду заробітної плати складемо баланс робочого часу одного середньоспискового робітника:

Календарний фонд часу – 365 днів.

Вихідні дні – 91.

Номинальний фонд робочого часу – 274 дні.

Всього невиходи на роботу – 27 днів.

Ефективний час роботи – 247 днів.

Середня тривалість роботи одного робітника – 1927 годин.

Коефіцієнт перерахунку –  $365/247 = 1.47$ .

Згідно даних підприємства, на заводі застосовується чотирибригадний графік з тривалістю зміни 7,8 години.

### 5.5. Розрахунок річного фонду заробітної плати робітників

Річний фонд заробітної плати визначають за штатним розписом і посадовими окладами. За даними підприємства річний фонд заробітної плати служби КВП і А складає: до введення автоматизації – 385458,69 грн, після введення автоматизації - 297483,15 грн.

Розрахуємо економію по заробітній платі за формулою:

$$E_3 = \frac{\Phi_{п1}}{Q_1} \cdot Q_2 - \Phi_{п2}, \text{ де}$$

$\Phi_{п1}$ ,  $\Phi_{п2}$  – річний фонд заробітної плати відповідно до і після введення автоматизації;  $Q_1$ ,  $Q_2$  – річний випуск продукції в натуральних одиницях відповідно до і після введення автоматизації.

Тоді

$$E_3 = \frac{38545869}{5380,6} \cdot 5649,6 - 29748315 = 10724625 \text{ грн.}$$

### 5.6. Розрахунок річного економічного ефекту і терміну окупності

Річний економічний ефект визначаємо за формулою :

$$\epsilon_p = \epsilon_{заг} - E_n * K ;$$

$$\epsilon_{заг} = \epsilon_i - B ;$$

де  $\varepsilon_{\text{заг}}$ - загальна умовно-річна економія за рахунок різноманітних джерел;

$\varepsilon_i$  - економія за рахунок  $i$ -го джерела (палива, енергії, зарплати);

$E_n * K$  - капітальні затрати на автоматизацію (згідно кошторису) ;

$E_n$  - нормативний коефіцієнт ( $E_n = 0.15$ );

$B$  - експлуатаційні затрати на автоматизацію.

Таким чином,  $\varepsilon_i = 210993,94$  грн.  $B = 33935,4$  грн.  $K = 139161,87$  грн.

$$\varepsilon_{\text{заг}} = 210993,94 - 33935,4 = 177058,54 \text{ грн.}$$

Річний економічний ефект :

$$\varepsilon_p = 177058,54 - 0.15 * 139161,87 = 156184,26 \text{ грн.}$$

Термін окупності визначимо за формулою:

$$T_{\text{ок}} = K / \varepsilon_{\text{заг}} = 139161,87 / 177058,54 = 0,786 \text{ року} = 287 \text{ днів.}$$

Коефіцієнт ефективності  $\varepsilon = \varepsilon_{\text{заг}} / K = 1 / T_{\text{ок}} = 1 / 0,786 = 1,27$ .

Річний економічний ефект від запровадження автоматизації даного технологічного процесу 156184,26 грн. Термін окупності – 0,786 року.

*Таблиця 5.2*

### Основні техніко-економічні показники

№	Показник	Одиниці виміру	Величина	
			По проекту	По заводських даних
1.	Річний випуск продукції в натуральному вигляді	тони	5649,6	5380,6
2.	Витрати на автоматизацію	грн	139161,87	94193,58
3.	Собівартість	грн	465,48	469,54
4.	Річний економічний ефект	грн	156184,26	-
5.	Термін окупності	рік	0,786	-
6.	Коефіцієнт порівняльної ефективності		1,27	-

На основі проведених розрахунків можна стверджувати, що запровадження запропонованої системи автоматизації дає річний економічний ефект в сумі 156184,26 гривень, а термін окупності становить 0,786 року.



## Висновки

На основі виконаних досліджень проведена розробка системи автоматизації процесу кристалізації адипінової кислоти, зокрема:

1. Процес кристалізації - виділення твердої розчиненої речовини з розчину. Кристалізація застосовується у виробництвах солей та інших речовин, а також для одержання твердих речовин у чистому вигляді шляхом перекристалізації. Адипінову кислоту  $C_6H_{10}O_4$  отримують окисленням циклогексанолу (анолу) або суміші циклогексанону і циклогексанолу (анолону) 40-55%-ою азотною кислотою при температурі 75-85°C та атмосферному тиску в присутності змішаного каталізатора нітрату міді  $[Cu(NO_3)_2]$  та метаванадату амонію  $(NH_4VO_3)$ . Технічним показником процесу кристалізації, метою якого є тільки виділення твердої речовини із розчину, є *ступінь кристалізації*, що виражається відношенням кількості виділеної твердої речовини до її вмісту у початковому розчині. Показником ефективності процесу є розмір отриманих кристалів.

2. Для даного об'єкта регулювання вхідними величинами кристалізатора є:  $F_k$  – витрата концентрованого розчину;  $F_m$  – витрата маточного розчину;  $F_b$  – витрата холодної води. Збурюючі величини:  $C_k$  – концентрація початкового розчину;  $\theta_k$  – температура початкового розчину;  $\theta_b$  – температура холодної води. Вихідні величини:  $F_{кр}$  – витрата кристалів;  $\theta$  – температура кристалізації;  $C_m$  – концентрація маточного розчину;  $L$  – рівень в кристалізаторі.

3. Регульованими технологічними параметрами у процесі кристалізації є: температура в кристалізаторі, яка залежить від витрати та температури початкового розчину та холодоносія; рівень у апараті, який залежить від витрати суспензії, маточного, початкового розчинів та холодоносія; витрата початкового розчину. Для підтримання температури в кристалізаторі на заданому значенні, регулююча дія має бути спрямована на зміну ступеня відкриття регулюючого органу на лінії подачі холодоносія. Для підтримання рівня в апараті на заданому значенні регулююча дія має бути спрямована на зміну ступеня відкриття

регулюючого органу на лінії суспензії з кристалами. Для підтримання витрати початкового розчину на заданому значенні регулююча дія має бути спрямована на зміну ступеня відкриття регулюючого органу на лінії його подачі.

4. Розглянуто існуючі схеми автоматизації та синтезована ФСА для заданих умов роботи. Запропонована в кваліфікаційній роботі система керування технологічним процесом розроблена на основі мікропроцесорного контролера „Реміконт Р-130”. Для автоматизації процесу кристалізації у кристалізаторі потрібно підтримувати на постійному рівні температуру та рівень в апараті, витрату початкового розчину. Для вимірювання витрат початкового розчину, холодної води, маточного розчину та вихідної суспензії використаємо вимірювальну систему, до складу якої входить давач витрати *SITRANS F M MAGFLO типу MAG 3100 і перетворювач сигналу MAG 5000*. Впровадження таких технічних засобів підвищить надійність управління даним процесом.

5. Для автоматизації процесу у кристалізаторі рівень кристалів потрібно підтримувати на постійному рівні. Рівень в апараті мірятимемо за допомогою хвилеводного радарного давача рівня *Rosemount моделі 3302* з діапазоном вимірювання від 0,1 до 20 м. Значення рівня перетворюється в сигнал постійного струму 4-20 мА. Рівень вимірюється за допомогою мікрохвильового імпульсу малої потужності тривалістю в одну наносекунду, що направляється по зонду зануреному у продукт, рівень якого необхідно виміряти. Компактний малоканальний мікропроцесорний контролер Реміконт Р-130 - це програмно-технічний виріб. Реміконт Р-130 - це комплекс технічних засобів. Складається він з окремих конструктивно автономних і функціонально закінчених блоків: центрального блока контролера БК-21 і блоків, що доповнюють центральний блок контролера.

6. Від вимірювальних перетворювачів аналогові сигнали витрати початкового розчину, температури кристалізації та рівня в кристалізаторі поступають на вхід алгоритму ВАА. ВАА (07) – вхід аналоговий гр.А;

застосовується для зв'язку функціональних алгоритмів з аналоговими засобами вводу (АЦП).

7. Програма функціонування контролера Р-130 реалізовує наступні контури: Контур регулювання витрати початкового розчину; Контур регулювання, сигналізації та захисту температури кристалізації; Контур регулювання рівня в кристалізаторі; Контур сигналізації режимів роботи насосу маточного розчину; Контур сигналізації режимів роботи насосу вихідної суспензії.

8. Для заданих критеріїв якості регулювання були розраховані оптимальні параметри настройки ПД-регулятора температури кристалізації ( $K_p=2.4453$ ;  $K_p/T_{із} = 0.0462$ ;  $T_d=25$ ). В середовищі SIMULINK пакету MATLAB був побудований перехідний процес з наступними критеріями якості регулювання:  
 $A_{\max} = 0.25 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $t_p = 280 \text{ c.}$ ,  $\psi=0.9$ .

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Автоматизація виробничих процесів: навч. посібник / Фединець В.О., Васильківський І.С., Николин Г.А.-Львів: СПОЛОМ, 2023.-192 с.
2. Л.М. Артюшин, О.А. Машков,Б.В. Дурняк,М.С. Сівов. Теорія автоматичного керування. — Львів: Видавництво УАД, 2004.
3. Бабіченко А.К. Промислові засоби автоматизації, Ч. 2 «Регулювальні і виконавчі пристрої»/А.К. Бабіченко, В.І. Тошинський, В.С. Михайлов та ін. – Х.: НТУ«ХПІ», 2003.– 658 с.
4. Бабіченко А.К. Практикум з вимірювань та технічних засобів автоматизації / А.К. Бабіченко, В.І. Тошинський, І.Л. Красніков та ін. – Х.: НТУ «ХПІ», 2009. – 114 с.
5. Барало О.В. Автоматизація технологічних процесів і системи автоматичного керування: навчальний посібник / О.В. Барало, П.Г. Самойленко, СЄ. Гранат, В.О. Ковальов. – К.: Аграрна освіта, 2010. – 557 с.
6. Воробйова О.М. Технічні засоби автоматизації: навч. посіб. / Воробйова О.М., Флейта Ю.В. – Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2018. – 208 с.
7. Когутяк, М. І. Технічні засоби автоматизації: навч. посіб. / М. І. Когутяк. - Івано-Франківськ : ІФНТУНГ Факел, 2008. - 212 с. (Електронний ресурс, режим доступу: <http://194.44.112.13/chytalna/1367/index.html>)
8. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування: Підручник. – 2-ге вид., перероб. і доп. – К.: Либідь, 2007. – 656 с.
9. Процеси і апарати харчових виробництв. Курсове проектування: Навч. посіб./ За ред. проф. І.Ф. Малежика. - К.: НУХТ, 2012.
- 10.Б.Б. Самотокін. Курс лекцій з теорії автоматичного керування. — Житомир: ЖІТІ, 1997.
- 11.Теорія автоматичного керування : Частина І : Курс лекцій / Уклад. М.Г. Попович, Б.І. Приймак. – К.: НТУУ ”КПІ”, 2010. – 182 с. – Режим доступу: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/770>.
- 12.Теорія автоматичного керування : Частина ІІ : Курс лекцій / Уклад. М.Г. Попович, Б.І. Приймак. – К.: НТУУ ”КПІ”, 2012. – 165 с. – Режим доступу: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/2209>.
- 13.Ткачов В.В., Стаднік М.І., Шевченко В.І., Козарь М.В., Карпеко О.В. Технічні засоби автоматизації: Навчальний посібник. – Д.: НТУ «Дніпровська політехніка», 2018. – 142 с.
- 14.Control System Toolbox. User’s Guide, The MathWorks, Release 2009b, 2009
- 15.Phillips C., Harbor R. Feedback control systems, Prentice-Hall, 2000, 658 p.