

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Інженерно-хімічний факультет

(повна назва інституту/факультету)

Кафедра технічних та програмних засобів автоматизації

(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»

УДК 66.047:621.547

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Анатолій ЖУЧЕНКО

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2021 р.

## Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані сталі хімічні  
виробництва»

зі спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(код і назва)

на тему: Система адаптивного керування процесом сушіння дисперсних  
матеріалів

Виконав: студент II курсу, групи ХА-91мн

(шифр групи)

Пшеничний Максим Леонідович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник доц. каф. ТПЗА, к.т.н., доц. Безносик Юрій Олександрович

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

Рецензент \_\_\_\_\_

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

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

Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2021 року

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**  
**Інженерно-хімічний факультет**  
 (повна назва)

**Кафедра технічних та програмних засобів автоматизації**  
 (повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність 151- Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані сталі хімічні виробництва»

ЗАТВЕРДЖУЮ  
 Завідувач кафедри  
 \_\_\_\_\_ Анатолій ЖУЧЕНКО

« 02 » вересня 2020 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на магістерську дисертацію студенту**  
**Пшеничному Максиму Леонідовичу**  
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Система адаптивного керування сушінням дисперсного матеріалу,  
 науковий керівник дисертації Безносик Юрій Олександрович к.х.н. доц.,  
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання),  
 затверджені наказом по університету від «13» листопада 2020 р. №3207с
2. Термін подання студентом дисертації 11.04.2021
3. Об'єкт дослідження процес сушіння дисперсних матеріалів, сушильно–охолоджувальна установка
4. Вихідні дані Масова витрата висушеного дисперсного матеріалу  $G_f = 13.889$  кг/с. Початкова вологість матеріалу  $\omega_s = 0.8$  %. Кінцева вологість матеріалу  $\omega_f = 0.05$  %. Початкова температура дисперсного матеріалу  $T_{sm} = 60^\circ\text{C}$ . Кінцева температура дисперсного матеріалу  $T_{fm} = 25^\circ\text{C}$ . Температура сушильного та охолоджувального агентів перед калорифером  $T_a = 20^\circ\text{C}$ . Температура сушильного агента після калорифера  $T_{ah} = 90^\circ\text{C}$ .

5. Перелік завдань, які потрібно розробити Проаналізувати особливості існуючих методів сушіння дисперсних матеріалів та рівень їх автоматизації, обґрунтувати необхідність автоматизації, провести інформаційний аналіз існуючих методів і способів сушіння, проаналізувати особливості сушильно–охолоджувальної установки як об’єкта керування, дослідити типову схему автоматизації, провести аналіз режимних параметрів сушильно–охолоджувальної установки, розробити динамічну математичну модель об’єкта керування для подальшого використання як еталонної, здійснити синтез контуру адаптації на базі структури адаптивної системи з еталонною моделлю, обґрунтовано вибрати задачу для пристрою адаптації, Дослідити розроблену адаптивну систему керування сушінням дисперсного матеріалу методами теорії чутливості

6. Орієнтовний перелік графічного ( ілюстративного ) матеріалу Технологічна схема процесу сушіння дисперсного матеріалу, схема автоматизації процесу, блок–схема програмного модуля, адаптивна система керування

7. Орієнтовний перелік публікацій підготовка наукової статті або доповіді (тез) на наукову конференцію.

8. Дата видачі завдання 02 вересня 2020

#### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Огляд наукової літератури	02.09.20 – 31.10.20	
2	Розробка системи автоматизації	01.11.20 – 30.11.20	
3	Динамічна математична модель сушильно–охолоджувальної установки	01.12.20 – 15.01.21	
4	Розробка адаптивної системи керування	16.01.21 – 15.03.21	
5	Перевірка адаптивної системи методами теорії чутливості	16.03.21 – 15.04.21	
6	Оформлення пояснювальної записки, виконання ілюстративних матеріалів (презентації).	16.04.21 – 11.05.21	

Студент  
Науковий керівник дисертації

Максим ПШЕНИЧНИЙ  
Юрій БЕЗНОСИК

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка 117 сторінок, 37 рисунка, 6 таблиць, 7 додатків, 28 джерел згідно з переліком посилань.

### ДИНАМІЧНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, ДИСПЕРСНИЙ МАТЕРІАЛ, АДАПТАЦІЯ, СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦІЇ, СУШІННЯ

Темою даного дипломного проекту є «Система адаптивного керування сушінням дисперсного матеріалу».

Об'єктом дослідження є керування температурою та вологістю в процесі сушіння дисперсного матеріалу.

Метою роботи є розробка системи адаптивного керування на базі розробленої схеми автоматизації, розрахунок динамічної математичної моделі, розробка програмного забезпечення для розрахунку моделі.

Аналізуючи існуючі автоматизовані сушильні установки, можна зробити висновок, що дані системи не дають змоги висушувати і охолоджувати кінцевий продукт до вологості 0,05% та температури 25 °С.

Реалізована система автоматизації з підібраними засобами автоматизації дозволяє реєструвати, контролювати і регулювати технологічний процес сушіння дисперсних матеріалів.

Для об'єкту керування, сушильно–охолоджувальної установки розроблено динамічні математичні моделі для сушильної і охолоджувальної камер. Розроблено програмний модуль з допомогою технології .NET Framework та мови програмування C#.

В проекті досліджується адаптивна система керування (САК) процесом сушіння дисперсних матеріалів з еталонною математичною моделлю та оптимальними ідентифікаторами.

Удосконалення сушильного відділення може відбуватися за рахунок високоточного автоматизованого обладнання, яке здатне зменшити використання людського фактору і збільшити якість продукції.

## РЕФЕРАТ

Пояснительная записка 117 страниц, 37 рисунков, 6 таблиц, 7 приложений, 28 источников согласно с перечнем ссылок.

### ДИНАМИЧЕСКАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ДИСПЕРСНЫЙ МАТЕРИАЛ, АДАПТАЦИЯ, СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦИИ, СУШКА

Темой данного дипломного проекта является «Система адаптивного управления сушкой дисперсных материалов».

Объектом исследования является управление температурой и влажностью в процессе сушки дисперсного материала.

Целью работы является разработка системы адаптивного управления на базе разработанной схемы автоматизации, расчет динамической математической модели, разработка программного обеспечения для расчета модели.

Анализируя существующие автоматизированные сушильные установки, можно сделать вывод, что данные системы не позволяют высушивать и охлаждать конечный продукт до влажности 0,05% и температуре 25 ° С.

Разработана система автоматизации с подобранными средствами автоматизации, позволяет регистрировать, контролировать и регулировать технологический процесс сушки дисперсных материалов.

Для объекта управления, сушильно–охладительной установки разработаны динамические математические модели для сушильной и охлаждающей камер. Разработан программный модуль с помощью технологии .NET Framework и языка программирования C #.

В проекте исследуется система адаптивного управления (САУ) процессом сушки дисперсных материалов с эталонной математической моделью и оптимальными идентификаторами.

Совершенствование сушильного отделения может происходить за счет высокоточного автоматизированного оборудования, которое способно уменьшить использование человеческого фактора и увеличить качество продукции.

## ABSTRACT

Explanatory note has 117 pages, 37 figures, 6 tables, 7 annexes, 28 sources.

DYNAMIC MATHEMATICAL MODEL, DISPERSED MATERIAL,  
ADAPTATION CIRCUIT, AUTOMATION SYSTEM, DRYING

The topic of this diploma project is "Adaptive control system for drying of dispersed material".

The object of research is to control the temperature and humidity during the drying of the dispersed material.

The purpose of the work is to develop an adaptive control system based on the developed automation scheme, calculation of a dynamic mathematical model, development of software for model calculation.

Analyzing the existing automated drying units, we can conclude that these systems do not allow to dry and cool the final product to a humidity of 0.05% and a temperature of 25 ° C.

Implemented automation system with selected automation tools allows you to register, control and regulate the technological process of drying disperse materials.

Dynamic mathematical models for drying and cooling chambers have been developed for the control object of the drying and cooling unit. Developed a software module using .NET Framework technology and C # programming language.

The project investigates the adaptive control system (ACS) of the drying process of dispersed materials with a reference mathematical model and optimal identifiers.

Improvement of the drying compartment can be due to high-precision automated equipment that can reduce the use of the human factor and increase product quality.

## ЗМІСТ

Перелік умовних позначень та скорочень .....	9
ВСТУП .....	10
1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ СУШІННЯ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	13
1.1 Загальна характеристика методів сушіння .....	13
1.2 Аналіз існуючого математичного забезпечення .....	18
1.3 Уявлення про адаптивні системи керування .....	20
1.4 Аналіз вітчизняних та світових тенденцій сушіння та існуючих автоматизованих систем керування .....	22
1.5 Аналіз адаптивної системи методами теорії чутливості.....	27
1.6 Постановка задачі дослідження .....	29
2 АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ .	31
2.1 Аналіз технологічної схеми процесу сушіння дисперсних матеріалів .....	32
2.2 Аналіз сушильно-охолоджувальної установки, як об'єкта керування.....	35
2.3 Аналіз параметрів технологічної схеми.....	37
2.4 Визначення параметрів автоматизації .....	38
Висновки .....	42
3 РОЗРОБКА ДИНАМІЧНОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ БАГАТОТРУБНОЇ СУШИЛЬНО-ОХОЛОДЖУВАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ .....	43
3.1 Аналіз режимних параметрів установки.....	43
3.2 Математичне забезпечення для системи адаптивного керування .....	45
3.2.1 Розрахунок матеріальних та теплових балансів .....	46
3.2.2 Розрахунок матеріальних та теплових балансів .....	49
3.2.3 Математична модель для сушильної камери .....	51
3.2.4 Математична модель для охолоджувальної камери .....	56
3.3 Програмний модуль для розрахунку сушильно-охолоджувальної установки .....	58
3.3.1 Технічне завдання на розробку програмного модулю .....	58
3.3.2 Розрахунок установки для сушіння дисперсних матеріалів.....	59
3.3.3 Інструкція по користуванню програмним продуктом.....	62

Висновки .....	67
4 АДАПТИВНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ СУШІННЯМ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ .....	68
4.1 Характеристика системи .....	68
4.2 Вибір оптимального регулятора.....	69
4.3 Синтез контуру адаптації і аналіз методами теорії чутливості .....	77
Висновки .....	84
ВИСНОВКИ.....	85
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ .....	86
Додаток А.....	90
Додаток Б .....	93
Додаток В .....	95
Додаток Г .....	99
Додаток Д.....	101
Додаток Е .....	111
Додаток Ж .....	116

## Перелік умовних позначень та скорочень

САК – система адаптивного керування;

АСУ – автоматизовані системи управління;

ТК – технологічні комплекси;

$G_{sm}$  – масова витрата вологого дисперсного матеріалу, кг/с;

$G_{fm}$  – масова витрата висушеного дисперсного матеріалу, кг/с;

$\omega_{sm}$  – початкова вологість дисперсного матеріалу, %;

$\omega_{fm}$  – початкова вологість дисперсного матеріалу, %;

$T_{sm}$  – початкова температура дисперсного матеріалу, °С;

$T_{fm}$  – кінцева температура дисперсного матеріалу, °С;

$T_a$  – температура сушильного та охолоджувального агентів перед калорифером, °С;

$T_{ah}$  – температура сушильного агента після калорифера, °С.

## ВСТУП

Сушіння матеріалів не займає останнє місце в хімічній промисловості. Це досить поширений і складний технологічний процес. Висушування продукту являється завершальним етапом в більшій частині хімічних підприємств.

Згідно основних європейських вимог незавершеність процесів адаптації тягне за собою якість та безпечність більшості продуктів харчової та хімічної промисловості. Це вимагає впровадження нових потужних автоматизованих систем, які здатні забезпечити якість кінцевого продукту, здешевити їх транспортування, а також збільшити його собівартість.

Актуальність проблеми полягає в розробці системи, яка зможе самостійно адаптуватися під поставлену ціль, отримання якісного і безпечного продукту. Світові тенденції говорять, що такі системи здатні зменшити складну екологічну ситуацію і збільшити економічні поканики підприємства.

Це вимагає, як створення нових підприємств так і модернізації вже існуючої бази, автоматизації, оптимізації і адаптації технологічних процесів сушіння дисперсних матеріалів.

**Метою роботи** є підвищення ефективності процесу сушіння і збереження кінцевого продукту за рахунок розробки системи адаптивного керування, що керується еталонною моделлю.

**Об'єктом дослідження** є керування температурою та вологістю в процесі сушіння дисперсного матеріалу.

**Предметом дослідження** виступає адаптивна система керування (САК) процесом сушіння дисперсних матеріалів з еталонною моделлю та оптимальним ідентифікатором.

**Задачі дослідження.** Досягнення поставленої мети можливе з розв'язанням наступних задач:

- 1) Провести аналіз існуючих методів та систем керування.

- 2) Спроекувати систему автоматизації з використанням сушильно–охолоджувальної установки та обрати основні технічні засоби автоматизації;
- 3) Розробити динамічну математичну модель, яка буде використовуватись як еталонна. Створити програмне забезпечення для розрахунку даної моделі.
- 4) Спроекувати та розрахувати контур адаптивної системи управління;
- 5) Проаналізувати контур адаптивної системи управління методами теорії чутливості.

Наукова новизна роботи визначається тим, що на базі багатотрубної сушильно–охолоджувальної установки револьверного типу, створюється система адаптивного керування. За рахунок зміни параметрів, та адаптації системи, можна регулювати оптимальні показники якості продукції, а саме вологості і температури. Алгоритм рішення дозволяє знайти оптимальні параметри для економічного та екологічного режиму сушіння.

По роботі магістерської дисертації були опубліковані наступні публікації:

1. Бойко Т. В. До питання математичного моделювання сушильно-охолоджувальної установки у виробництві цукру / Т. В. Бойко, А. О. Абрамова, М. Л. Пшеничний // Матеріали другої міжнародної науково-практичної конференції «Інтеграційні та інноваційні напрями розвитку харчової індустрії». Том I. вид. ФОП Гордієнко Є.І., Черкаси, 2019. 33 – 37 с.
2. Бойко Т. В., Абрамова А. О., Складанний Д. М., Пшеничний М.Л. Особливості сушильно-охолоджувальної установки як об'єкта керування. Збірник наукових статей Восьмої міжнародної науково-практичної конференції «Комп'ютерне моделювання в хімії і та технологіях і системах сталого розвитку – КМХТ2020», Київ 19-22 травня 2020 року. Київ, 2020. 182-186 с.
3. Бойко Т.В., Пшеничний М.Л. До питання автоматизації сушіння кристалічних матеріалів. VIII Міжнародна конференція студентів,

аспірантів та молодих вчених з хімії та хімічної технології, 22-23 квітня 2020, Київ. 100с.

4. Пшеничний М. Л., Безносик Ю. О., Бугаєва Л. М. Конструювання автоматизації складних технологічних об'єктів з урахуванням систем адаптивного керування. Контроль і управління в складних системах (КУСС-2020). XV Міжнародна конференція. Тези доповідей. Вінниця, 8-10 жовтня 2020 року. Вінниця: ВНТУ. 2020 с. 20-22. ISBN 978-966-641-813-3.
5. Пшеничний М. Л., Безносик Ю. О. Аналіз режимних параметрів сушильно-охолоджувальної установки. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2021 : Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів (АКІТ –2021); м. Київ, 21–22 квітня 2021 р. С. 7-8.

# 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ СУШІННЯ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ

## 1.1 Загальна характеристика методів сушіння

Існує декілька класифікацій методів сушіння. Однією з найбільш вживаних класифікацій, а саме по способу підводу енергії до висушуваного розрізняють наступні види сушіння [1]:

### 1) теплові методи сушіння:

- конвективне сушіння – шляхом безпосереднього контактування висушуваного матеріалу з сушильним агентом в якості якого зазвичай використовують нагріте повітря або топочні гази (як правило в сушінні з повітрям);
- кондуктивне сушіння – шляхом передачі тепла від теплоносія до матеріалу через розділяючу їх стінку;
- терморадіаційне сушіння – шляхом передачі тепла інфра-червоними променями;
- сушіння у полі струмів високої частоти (діелектричне сушіння) – ґрунтується на явищі поляризації.

### 2) спеціальні методи сушіння:

- сушіння у вакуумі (сублімаційне сушіння) – сушіння в замороженому стані при глибокому вакуумі;
- сушіння обезводненим повітрям – зменшення вологовмісту за допомогою вологовбирачів: силікагелю, активованого вугілля (при цьому виникають додаткові витрати на обезводнення вологовбирачів);
- контактне (сорбційне) сушіння – залежить від температури та інших факторів, які характеризують стан і гігроскопічність матеріалу та сорбенту;

### 3) механічні методи сушіння:

- віджимання;
- центрифугування.

Дисперсні матеріали, до яких відносяться зернисті, порошковидні, гранульовані, дроблені тверді, а також дисперговані рідини і пастовидні продукти, в хімічній технології висушуються, головним чином, конвективним способом [2].

Техніка сушіння розвивалась по шляху переважного нарощування конвективних сушарок. Привабливість цього способу пояснюється наступними обставинами. Технічно просто нагріти повітря, з допомогою якого передати енергію висушуваного продукту. Потік цього повітря являється і середовищем сприймаючим вологу з продукту [2].

Конструкції сушарок досить різноманітні і відрізняються по ряду признаков: по способу підводу тепла (конвективні, контактні і т.д.), по виду використовуваного теплоносія (повітряні, газові, парові), по величині тиску в сушильній камері (атмосферні і вакуумні), по способу організації процесу (періодичні і безперервні), а також по взаємному напрямку руху матеріалів і сушильного агента в конвективних сушарках (прямотік, протитік, перехресний тік) [2].

### ***Конвективні сушарки з нерухомим або рухомим густим шаром матеріалу***

*Камерні сушарки.* Камерна сушарка зображена на рисунку 1.1. Ці сушарки являються апаратами періодичної дії, працюючі при атмосферному тиску.

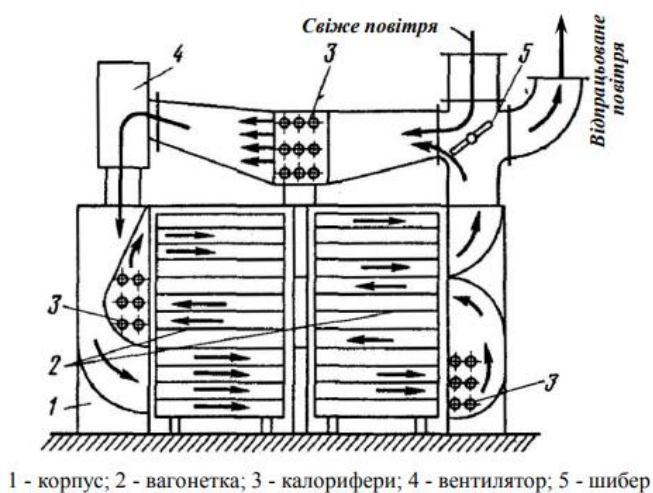


Рисунок 1.1 – Камерна сушарка

Вони використовуються у виробництвах невеликого масштабу для матеріалів, які допускають невелику температуру сушіння. Матеріал в цих сушарках сушиться на лотках (противнях), встановлених на стелажах або вагонетках, які знаходяться всередині сушильної камери [2].

Сушарка працює з проміжним підігрівом і рециркуляцією повітря, тобто по варіанту, забезпечуючому низьку температуру і більш м'які умови сушіння. В результаті сушіння в нерухомому товстому шарі сушарки цього типу мають низьку продуктивність і час сушіння в них великий [2].

*Тунельні сушарки.* Тунельна сушарка зображена на рисунку 1.2.

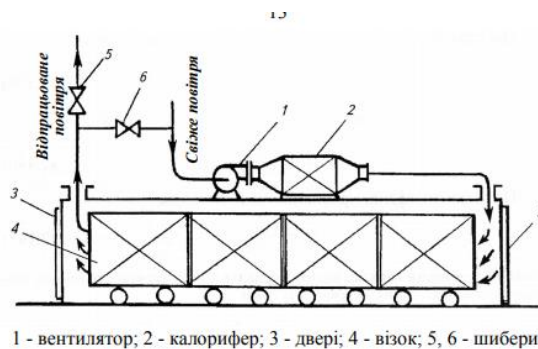


Рисунок 1.2 – Тунельна сушарка

Ці сушарки відрізняються від камерних тим, що в них з'єднані між собою вагонетки поволі переміщуються по рейках вздовж дуже довгої камери прямокутного перерізу (коридора). На вході і на виході коридор має герметичні двері, які одночасно періодично відчиняються для завантаження і вивантаження матеріалу: вагонетка з висушеним матеріалом видаляється з камери, а з протилежного кінця в неї поступає нова вагонетка з вологим матеріалом. Переміщення вагонеток проводиться з допомогою троса і механічної лебідки. Тунельні сушарки зазвичай працюють з частковою рециркуляцією сушильного агента, і вони використовуються для сушіння великої кількості штучних матеріалів [2].

*Стрічкові сушарки.* Стрічкова сушарка зображена на рисунку 1.3. В цих сушарках сушіння матеріалу проводиться безперервно при атмосферному тиску. В камері сушарки шар висушуваного матеріалу рухається на безкінцевий

стрічці, натягнутій між ведучим і відомим барабанами. Вологий матеріал подається на один кінець стрічки, а підсушений видаляється з другого кінця [2].

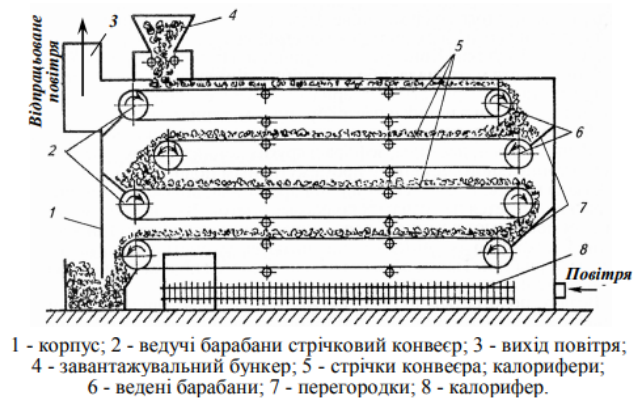


Рисунок 1.3 – Стрічкова сушарка

Сушіння здійснюється гарячим повітрям або топочними газами, які рухаються протитоком або перехресним током до напрямку руху матеріалу.

Стрічкові сушарки громіздкі та важкі в обслуговуванні головним чином від перекосів і розтягування стрічок, їх питома продуктивність (на 1м<sup>2</sup> поверхні стрічки) невелика, а питомі витрати тепла (на 1кг випареної вологи) доволі високі [2].

### ***Конвективні сушарки з перемішуванням шаром матеріалу***

**Барабанні сушарки.** Ці сушарки широко використовується для безперервного сушіння при атмосферному тиску кускових, зернистих і сипучих матеріалів (рис. 1.4).

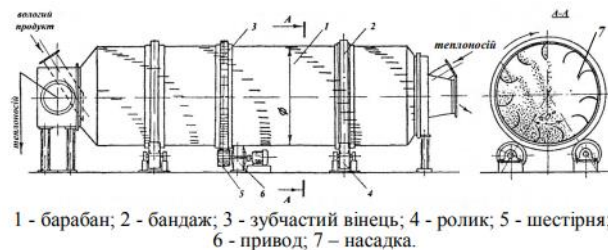
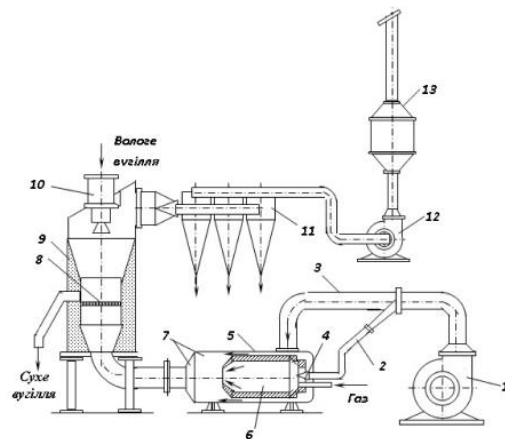


Рисунок 1.4 – Барабанна сушарка

Барабанна сушарка має циліндричний барабан, встановлений з невеликим нахилом до горизонту, який спирається з допомогою банджів на ролики. Барабан приводиться до обертання з допомогою електродвигуна через редуктор і

зубчасту передачу. Число обертів барабана зазвичай не перевищує  $5-8 \text{ хв}^{-1}$ ; положення його в осьовому напрямку фіксуються опорними роликками. Матеріал подається в барабан через спеціальний пристрій, попередньо підсушується, переміщуючись лопастями приймально-гвинтової насадки, а потім поступає на внутрішню насадку розташовану вздовж майже всієї довжини барабана. Насадка забезпечує рівномірний розподіл і хороше перемішування матеріалу по перерізу барабана, а також його тісний контакт при пересипанні з сушильним агентом [2].

*Сушарки з “киплячим” шаром.* Ці сушарки являються одним з прогресивних типів апаратів для сушіння. Процес в “киплячому” шарі дозволяє значно збільшити поверхню контакту між частинками матеріалу і сушильним агентом, інтенсифікувати випарювання вологи з матеріалу і скоротити (до декількох хвилин) час сушіння (рис. 1.5) [3].



1 – дуттєвий вентилятор; 2, 3 – повітропроводи; 3 – циклон; 4 – пальник;  
5 – топка; 6 – камера згоряння; 7 – камера змішування; 8 – решітка; 9 – камера сушки; 10 – живильник; 11 – циклон; 12 – димосос; 13 – скрубєр.

Рисунок 1.5 – Сушарка з “киплячим” шаром

Однак сушарки “киплячого” шару мають свої недоліки: підвищені витрати електроенергії для створення високої швидкості сушильного агента з метою створення “киплячого” шару і деяку підвищену питому витрату теплоти [3].

Найбільше розповсюдження великовантажних виробництвах одержали барабанні сушарки, оскільки вони мають велику потужність, надійні і прості в експлуатації і достатньо економічні. Вони використовуються для сушіння кускових і зернистих матеріалів [3].

Одним з недоліків барабанних сушарок є перетинання матеріалу при його переміщенні вздовж сушильних барабанів. Як правило діаметри барабанних сушарок сягають в середньому 3 метрів. Продукт, переміщуючись вздовж барабана пересипаючись з допомогою насадок падає зі значної висоти і частково передається в пил [3].

## 1.2 Аналіз існуючого математичного забезпечення

В процесі сушки високовологих дисперсних матеріалів з незначною енергією зв'язку вологи з матеріалом швидкість видалення вологи може бути прийнята постійною до досягнення матеріалом рівноважного вологовмісту (рис. 1.6). При цьому температура шару матеріалу та сушильного агенту, що покидають сушку, буде близька до адіабатичної температури насичення вхідного потоку сушильного агенту (температурі мокрого термометру) [4].

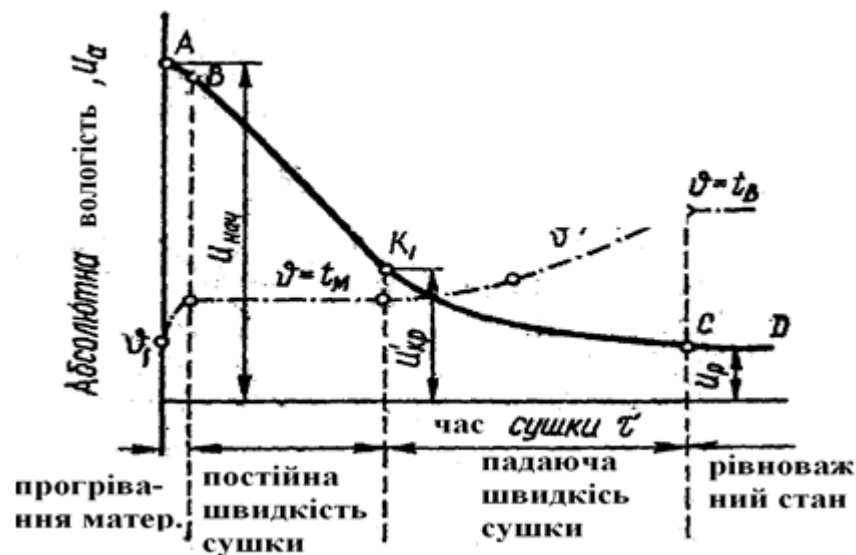


Рисунок 1.6 – Крива сушки матеріалу та зміни температури в процесі сушки:

$\theta$  – температура поверхні матеріалу,  $\theta_1$  – початкова температура матеріалу,  $t_m$  – температура мокрого термометру,  $t_b$  температура повітря,  $u_n$  – початкова вологість матеріалу,  $u_{kp}$  – критична вологість матеріалу,  $u_p$  – рівноважна вологість матеріалу [4].

Тоді, з урахуванням того, що [4]:

- 1) потік рівномірно розподіляється по всьому об'єму;
- 2) агент та матеріал рухаються в режимі ідеального витеснення;
- 3) температура матеріала на вході в апарат та в процесі сушки дорівнюють температурі мокрого термометра;
- 4) температура сушильного агенту, що виходить з апарату дорівнює температурі мокрого термометру;
- 5) швидкість видалення вологи з матеріалу постійна;
- 6) все тепло, що передається від сушильного агенту поверхні вологого матеріалу витрачається на випаровування вологи;
- 7) щільності та теплоємності середовищ постійні в області робочих температур;
- 8) частинки матеріалу мають сферичну форму;
- 9) втрати в навколишнє середовище не враховуються.

Виходячи з допущень математичну модель процесу сушки можна представити як:

$$\begin{cases} -G_T \cdot c_T \cdot \frac{dT}{dh} = \frac{6 \cdot (1 - \varepsilon)}{d} \cdot \alpha \cdot (T - T_m) \cdot S \\ V \cdot \rho \cdot q \cdot \frac{du}{dh} = \frac{6 \cdot (1 - \varepsilon)}{d} \cdot \alpha \cdot (T - T_m) \cdot S \end{cases}, \quad (1.1)$$

$$T(h=0) = T_{ex}, \quad u(h=H) = u_{ex},$$

де  $\frac{6 \cdot (1 - \varepsilon)}{d}$  – поверхня монодисперсних сферичних часток, що приходить на одиницю висоти шару матеріалу;  $d$  – діаметр часток, м;  $V$  – витрата матеріалу, м<sup>3</sup>/год;  $G_T$  – масова витрата сушильного агенту, кг/год;  $T$  – температура сушильного агенту, °С;  $T_m$  – температура мокрого термометру, °С;  $S$  – площа поперечного перетину апарату, м<sup>2</sup>;  $h$  – координата висоти апарату, м;  $u$  – вміст вологи в матеріалі, кг вологи/кг сухого матеріалу;  $q$  – питома теплота випаровування, кДж/кг;  $c_T$  – теплоємність сушильного агенту, кДж/(кг·°С);  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі від сушильного агенту до матеріалу, кДж/(м<sup>2</sup>·год·°С);  $\rho$  – густина матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;  $\varepsilon$  – порізність шару матеріалу [4].

### 1.3 Уявлення про адаптивні системи керування

Під час проектування автоматичних систем розрахунок їх параметрів виконують за припущеннями, що статичні та динамічні характеристики об'єкта керування й усіх елементів системи відомі й не змінюються протягом експлуатації та при змінюванні зовнішніх умов. Однак характеристики об'єкта і деяких елементів системи бувають відомі лише приблизно, змінюються через фізичне старіння і, крім того, залежать від зовнішніх умов. Завдяки запасам стійкості система керування буде задовільно працювати й у тому разі, коли практичні характеристики об'єкта трохи відрізняються від розрахункових. Однак у деяких випадках діапазон змінювання статичних і динамічних характеристик настільки великий, що керування об'єктом за допомогою найпростішої системи з постійними параметрами виявляється або незадовільним, або зовсім неможливим (утрата стійкості). У таких випадках можна застосувати систему керування зі змінними властивостями [5].

Процес змінювання властивостей системи, що дозволяє їй досягти найкращого або, у крайньому разі, задовільного функціонування за умов, що змінюються, називається *адаптацією*. Системи, що здійснюють процес адаптації, називаються *адаптивними*. Отже, адаптивна САК – це система, яка здатна у процесі виконання основної задачі керування за рахунок змінювання параметрів і структури регулятора поповнювати нестачу інформації про об'єкт керування і діючи на нього зовнішні збурення і тим самим поліпшувати якість свого функціонування. Пристрій, що реалізує алгоритм адаптації, називається *адаптером* (рис. 1.7) [6].



Рисунок 1.7 – Функціональна схема адаптивної системи керування

Особливість структури адаптивних системи полягає у тому, що вони мають додатковий контур – *контур адаптації*, призначений для перероблення інформації про умови роботи, що змінюються, і подальшого впливу на регулятор основного контуру керування.

Адаптер у загальному випадку дістає інформацію про вхідну дію  $x$ , збурення  $f$ , вихідну величину  $y$  і діє на керуючий пристрій основного контуру. Отже, для контуру адаптації об'єктом керування є вся основна САК [6].

Слід зазначити, що адаптивні системи давно існують у природі. Властивість адаптації чітко виявляється, наприклад, у тому, що живі організми здатні утримувати свої координати (наприклад, температуру) в припустимих фізіологічних межах при значних змінах умов, у яких існує організм [6].

Характерною ознакою адаптивних систем є відсутність повної апріорної (такої, що відома наперед) інформації про об'єкт керування, зовнішні збурення і граничні умови, тобто адаптивній системі притаманна невизначеність. Функціонування системи спрямоване на розкриття цієї невизначеності, тобто знаходження такого стану, при якому задовольняється певний критерій [6].

Розкриття невизначеності адаптивних систем забезпечується завдяки:

- надмірності (складності) системи, яка виявляється у багатоступеневості, багатоконтурності й т.д.;
- логічності її дії, подібно до логічного мислення людини;
- прогнозуванню стану системи і аналізу інформації, що накопичується, з метою самонавчання [6].

Оптимальне функціонування системи може розраховуватись на підставі аналізу інформації про її стан. Такі системи називаються *аналітичними*. Якщо оптимальний режим роботи визначається у результаті пошуку умов екстремуму критерію ефективності, то системи називаються *пошуковими*. У цьому випадку система ніби ставить серії експериментів і отримує з них дані, необхідні для поліпшення своєї якості [6].

Змінювання стану системи можна здійснювати за рахунок зміни керуючих впливів, параметрів настроювання і структури системи. Ці зміни називаються

*контрольованими*. Залежно від обсягу цих змін адаптивні системи розділяються на [6]:

- 1) *екстремальні*, в яких можна здійснювати змінювання лише керуючих впливів.
- 2) *самоналагоджувані*, в яких, крім того, змінюються параметри системи.
- 3) *самоорганізовані*, в яких, крім керуючих впливів і параметрів, змінюється ще й структура системи.
- 4) *навчанні*, в яких до того ж, може змінюватись алгоритм роботи, а у разі самонавчання – і критерій ефективності.

За способом здійснювання контрольованих змін адаптивні системи розділяються на [6]:

- 1) пасивні, в яких зміни здійснюються за наперед розробленою програмою, наприклад, оброблення початкової інформації (висота, швидкість, атмосферні умови та ін.) у системі керування автопілотом;
- 2) активні, в яких контрольовані зміни наперед не визначені, а диктуються ситуацією, що склалася.

Зазначимо також, що адаптивні системи можуть працювати за замкнутим і розімкнутим циклами: у першому випадку виконується аналіз контрольованих змін, у другому – ні. Природно, що найдосконалішими є аналітичні активні замкнуті навчання системи [6].

#### **1.4 Аналіз вітчизняних та світових тенденцій сушіння та існуючих автоматизованих систем керування**

Важливим фактором підвищення ефективності роботи технологічних комплексів є покращення управління що в свою чергу вимагає використання сучасних технологій автоматизації [7].

Сучасне промислове виробництво, будь-якої галузі промисловості об'єднує в собі склад комплексу інженерно-технічних засобів, комунікації, технологічних ліній. Одночасно один технологічний процес може забезпечити до декількох десятків різних пристроїв, механізмів і систем що виконують кожна

свою функцію. Завдання системи автоматизації – забезпечити найбільш раціональну (оптимальну) взаємодію всього обладнання, що входить в технологічний ланцюг виробничого процесу [8].

В сучасних системах автоматизації складних технологічних об'єктів намагаються об'єднати різні алгоритми оптимізації, адаптації, надійності, живучості, забезпечення якості керування, а також компенсації або хоча б суттєвого зменшення впливу збурень та запізень [8].

Сучасні теорії керування для синтезу та дослідження багатовимірних систем керування використовуються методи адаптивного та робастного управління. Для конкретного технологічного об'єкта оцінка доцільності застосування адаптивних систем передбачає використання таких процедур: аналіз функціонування, оцінка нестационарності, розробка структури системи керування, дослідження ефективності керування [9].

Синтез контур адаптації виконується на базі структури адаптивної системи еталонної моделі що має суттєві переваги перед іншими за рахунок високої швидкості адаптації та незначного об'єму необхідної апріорної інформації. В запропонованій адаптивній системі поведінка основного контуру порівнюється з поведінкою еталонної моделі і задача пристрою адаптації полягає в мінімізації функції неузгодженості їх станів шляхом зміни налаштувань регулятора основного контуру. Отже, виникає задача розробки динамічної математичної моделі, що в подальшому буде використана в якості еталонної моделі досліджуваного об'єкта [10].

Вибір того чи іншого виду математичної моделі залежить від обраного принципу синтезу оптимального регулятора та від найсуттєвіших нестационарностей [11].

Для розв'язання задач аналізу та синтезу системи управління відомі різні математичні моделі на основі лінійних та нелінійних диференціальних рівнянь. Моделі можуть бути побудовані у вигляді загальної моделі процесу або окремих його складових, пов'язаних між собою прямими і зворотними зв'язками [11].

На першому етапі для створення адаптивної системи керування процесом необхідно отримати лінійні математичні моделі процесу та привести їх до виду координатах стану [12].

Послідовність дій при синтезі адаптивних систем управління складається з наступних етапів [13]:

- підготовка вихідних даних (математична модель об'єкта управління, ціль управління, клас допустимих алгоритмів управління);
- вибір структури регулятора;
- вибір настрайованих параметрів;
- вибір алгоритму адаптації ;
- визначення можливості застосування і попередній розрахунок параметрів активної системи управління.

Основним компонентом адаптації є комплекс програмних засобів, і, як наслідок, математичне забезпечення на основі якого розроблені прикладні програми, що входять в його склад. Програмна реалізація моделі дозволяє адаптувати створено математичну модель до змінюваних умов роботи, тобто здійснювати перерахунок постійних часу та коефіцієнтів передачі при зміні режиму функціонування чи конструктивних особливостях об'єкта [14].

Адаптивні системи в умовах непередбачуваної зміни властивостей об'єкта, зовнішніх діянь управління автоматично змінюють структуру чи параметри регулятора, щоб забезпечити необхідну якість управління [15].

Останнім часом розвивається напрямок використання *мережевих структур* при управлінні складними об'єктами [16].

Мережеві структури – це такі структури системи, в яких можуть виникати і подвійне підпорядкування, і міжрівнева взаємодія, причому одні і ті ж суб'єкти можуть виступати як у ролі керуючих органів, так і в ролі підпорядкованих елементів, тобто вступати в мережевому взаємодію. Тобто мережева структура – набір апріорі рівноправних агентів, в якому можуть виникати тимчасові ієрархічні та інші структури, які визначаються тими задачами, що поставлені перед системою [16].

У мережевій структурі немає або майже немає керуючих елементів, є ситуаційні функціональні вузли, що виконують в різний момент різні ролі – ролі ресурсного центру, інформаційного, координаційного або розподільного центру [16].

За рівнем важливості вузлів в мережі існують наступні мережеві структури [16]:

1. Плоска мережа – всі вузли рівні за значенням, відсутні навіть “частковий” лідери.
2. Об’ємні (тривимірні) мережеві структури включають пріоритетними правих правами в часі (вузол переважає над іншими в який–небудь період часу), обмеженими певними ситуаціями або окремими завданнями і цілями.

Мережеві структури за своєю сутністю орієнтовані на вирішення конкретної задачі, в них максимально розділені відповідністю і ризики [16].

До переваг використання мережевих структур можна віднести [16]:

- їх високу адаптивність та швидку реакцію до зміни збуджень;
- конструкцією системи на пріоритетних напрямках при вирішенні проблеми та на унікальних процесах;
- істотне скорочення витрат, їх раціональної структури і підвищення доходів.

До мінусів можна віднести [16]:

- при формуванні мережевих моделей перевага віддається пріоритетним задачам, концентрації на ключових компетенціях, тоді як сучасні тенденції розвитку систем, навпаки, говорять про необхідність орієнтації на багатопланові підходи;
- існує небезпека надмірного ускладнення, що впливає, зокрема, з різномірності елементів системи, відкритості мереж, динаміки самоорганізації.

Одним з варіантів мережевого підходу є побудова *ситуаційно–подієвих мереж*.

Ситуаційний підхід в загальних випадках зводиться до оперативного визначення поточної ситуації, яка характеризує роботу системи в конкретний момент часу. Основним принципом його є формування моделей управління об'єктом, а не моделі самого об'єкта управління [16].

Поштовхом до розвитку ситуаційного підходу послужив ряд факторів, що впливають на ускладнення процесу прийняття рішення [16]:

- велика кількість інформації і зміни якості в процесі вироблення рішення;
- велика кількість факторів, що впливають на кінцеве рішення, які необхідно врахувати і часто складно коректно формалізувати аналітично;
- неповнота, неточність, невисока достовірність інформації, яка є основою для прийняття рішення;
- швидка зміна цілей управління;
- високі вимоги до якості і оперативності прийняття управлінського рішення в умовах дефіциту часу на його вироблення.

Існує ряд методів, що реалізують різні властивості ситуаційного підходу, починаючи формування штучних мов опису ситуацій і відносин між об'єктами до подання ситуації у вигляді сукупності значень фіксованого набору ознак [16].

Ситуація – це фактичний стан об'єкта і стан зовнішнього середовища в конкретний момент часу з описом типових умов прийняття рішень [16].

Ситуації бувають: початкові, перехідні, кінцеві, штатні, позаштатні, критичні, надзвичайні, передаварійні, аварійні, аварії, катастрофічні, оптимальні, еталонні. Всі вони характеризують з чотирьох можливих режимів технологічного комплексу: штатний, перехідний некерований, перехідний керований, нештатний [16].

Всі дії і впливи, що проводяться на ТК (технологічним комплексом) спрямовані на забезпечення його роботи в штатному режимі. Якщо один з показників або, значення групи змінних виходить за задані межі, система переходить в нештатний режим. Процес переходу між штатним і нештатним режимами відповідає перехідному [16].

Для забезпечення керованого перехідного режиму роботи ТК і недопущення непересічного доцільного використовувати *ситуаційно-сценарний підхід*, розробити базу сценаріїв розвитку ситуації, що виконують керуючих і і коригувальних впливів [16].

### 1.5 Аналіз адаптивної системи методами теорії чутливості

Чутливість – властивість об’єкта змінювати режим роботи під впливом змінних у часі параметрів, тобто цим характеризується нестационарність об’єкта. В першому наближенні визначити доцільність застосування адаптивних систем керування можна на основі функцій чутливості [14].

В теорії управління поняття чутливості перекликається з поняттям параметричності, інваріантності та грубості динамічної системи. Найбільш типовими параметрами в системах автоматичного управління є: коефіцієнти, що не залежать від часу; коефіцієнти що залежать від часу; параметри, що змінюють порядок системи; властивості; частота імпульсів; ширина та висота імпульсу; інтервал дискретності; моменти квантування; похибка квантування; похибки округлення [14].

Основними поняттями теорії чутливості є функція, коефіцієнт чутливості, основний та додатковий рухи [15].

Нехай  $x$  –  $n$ -вимірний вектор стану,  $y$  –  $q$ -вимірний вектор вихідних дій,  $F$  – оператор системи. Система також характеризується сукупністю  $m$  параметрів, що відображають її технічні характеристики та властивості зовнішнього середовища. Позначимо сукупність цих параметрів  $m$ -вимірним вектором  $\alpha$ . Тоді зв’язок між величинами  $x$ ,  $y$  та  $\alpha$  можна записати у наступному вигляді  $x = F(y, \alpha)$  [15].

Якщо початкові умови та вхідна дія  $y$  фіксовані, то властивості системи визначаються набором параметрів  $\alpha$  [15].

Очевидно, що від вектора  $\alpha$  буде залежити й показники якості  $\dot{I}$ , визначений на множині станів  $x$ :

$$\dot{I} = j[x] = \dot{I}(\alpha) \quad (1.2)$$

Зміна параметрів  $\alpha$  будуть призводити до змін як вектору стану  $x$ , так і показника якості  $I$  [15].

Здатність системи змінювати свою реакцію, виражену в  $x(t)$  або  $I$  на задані вхідні діяння при зміні параметрів  $\alpha$  називаються параметричною чутливістю, вивчення якої складає предмет теорії чутливості [15].

Так як вектор стану  $x$  є функцією часу, то при заданих початкових умовах та заданому  $y(t)$  має місце залежність  $x = x(t, \alpha)$  [15].

Нехай  $\alpha^o$  – фіксоване значення параметрів. Це значення може бути пов'язане з розрахунковим або номінальним режимом функціонування системи управління. Вектору  $\alpha^o$  відповідає наступне співвідношення для вектора стану [15]:

$$x^o = x(t, \alpha^o) \quad (1.3)$$

Функція  $x(t, \alpha^o)$  описує основний або базовий рух досліджуваної системи (незбурений стан). Йому відповідає основне (базове) значення показника якості [15]:

$$I = I(\alpha^o) \quad (1.4)$$

При зміні значення вектора параметрів на величину  $\Delta\alpha$  отримаємо параметрично збурений рух [18]:

$$x = x(t, \alpha^o + \Delta\alpha) \quad (1.5)$$

та збурене значення показника якості [18]:

$$I = I(\alpha^o + \alpha) \quad (1.6)$$

Чутливість системи кількісно характеризувати за топомогою функції чутливості. Якщо показник  $I(\alpha)$  є числовою величиною, тобто функціоналом (його аргументом є тільки параметри  $(\alpha_1 \dots \alpha_m)$  то похідна [15]:

$$\frac{\partial^{kI}}{\partial \alpha_i^{kj} \dots \partial \alpha_m^{km}} \cdot \sum_{i=1}^m K_I = K, \quad (1.7)$$

що визначається  $\Delta\alpha = 0$  називається коефіцієнтом чутливості [15].

Вплив варіацій параметрів на статичні і динамічні властивості системи називають параметричними збуреннями, а викликані ними відхилення координат – параметричними похибками. Якщо система зберігає свої

властивості при певних параметричних збуреннях, її називають грубою або робастною [16].

Чим менше значення функції чутливості, тим менші відхилення вихідних координат, тобто система грубіша, краща якість системи [16].

При врахуванні відмов різного роду технічних пристроїв приходиться стикатися з проблемою надійності. Відмови (миттєві або постійні) виникають зазвичай при зміні значень параметрів елементів пристроїв. Вплив зміни параметрів пристроїв та систем автоматичного управління на якість їх роботи розглядається і в теорії управління [16].

Теорія надійності та теорія чутливості вивчають явища однієї й тієї ж природи, хоча дещо з різних позицій [16].

Функції чутливості використовуються для оцінки ступеню впливу зміни параметрів на якість роботи системи. Поступові відмови, як правило, виникають при неконтрольованих змінах характеристик системи [16].

Однією з задач, де використовують функції чутливості, є задача визначення ймовірності того, що показник роботоздатності системи автоматичного управління знаходиться в заданих межах в момент часу  $t$  ввімкнення системи після зберігання [16].

Основними перевагами методів теорії чутливості в порівнянні з відомими методами дослідження точності систем (метод статичних випробувань, інтерполяційний метод) є простота обчислювального алгоритму, малий об'єм обчислень та можливість досліджень додаткового руху, викликаного кожним збурюючим фактором окремо [16].

## **1.6 Постановка задачі дослідження**

Аналізуючи вітчизняне і світове виробництво проаналізовано ряд недоліків: теперішні автоматизовані сушильні відділення не можуть повноцінно забезпечувати якість готової продукції. Конструктивні недоліки сушильних впливають, як на органолептичні показники, так і на економічні показники продукції. Наявні автоматизовані адаптивні системи, майже не застосовуються

для сушіння дисперсних матеріалів. Гарантія стабільності роботи передбачена лише на невеликій кількості установок.

З метою усунення конструктивних недоліків в роботі прийнята багатотрубна сушильно-охолоджувальна установка, в якій загальний потік поділено на 6 потоків, що значно зменшує перетирання матеріалу, а також дозволяє висушувати продукт до вологості 0,05% і температури 25 °С.

Метою проекту є розробка адаптивної системи керування, що використовує високоточне обладнання, новітні засоби автоматизації, яка у свою чергу здатна зменшити на хімічному підприємстві людський фактор, а також підвищити якість продукції та зменшити вплив на навколишнє середовище.

Основні задачі, які вирішуються в роботі:

1. Проектування системи автоматизації;
2. Розробка динамічної математичної моделі для використання в якості еталонної;
3. Проектування системи адаптивного керування;
4. Аналіз адаптивної системи методами теорії чутливості.

В якості збільшення показників, можна запропонувати автоматизації попередніх технологічних процесів (первинна переробка, дефекація, сатурація, сульфитація, фільтрація, очищення і упарювання сиропу, центрифугування).

## **2 АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ СУШННЯ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ**

Важливе місце із науково-технічних проблем розвитку хімічної промисловості посідає автоматизація виробничих процесів і виробництв.

Підвищення ефективності праці, покращення якості продукції, розроблення оптимальних умов використання усіх промислових ресурсів виробництва є основною метою автоматизації. Автоматизація, в умовах науково-технічного прогресу є однією з його рушійних сил. Вона робить суттєвий вплив на удосконалення технологій, механізацію виробничих процесів, забезпечує умови для створення більш складних високопродуктивних процесів, які без автоматизації розробити та реалізувати неможливо [16].

Основними задачами автоматизації виступають інтенсифікація виробництв на основі впровадження нових досягнень науки та техніки, скорочення числа технологічних переходів, впровадження адаптивних систем управління, подальший розвиток рівня механізації та автоматизації [16].

На сучасному етапі розвитку хімічної промисловості заснованого на безперервності технологічного процесу з використанням основного безупинно-діючого устаткування, є всі передумови для комплексної і повної автоматизації технологічних процесів [16].

Зростання продуктивності праці в хімічній промисловості, розробка нових технологій, спрямованих на поліпшення якості і підвищення ефективності виробництва, вимагають відновлення й удосконалювання систем керування на базі новітніх засобів вимірювання і автоматизації [16].

Автоматизація технологічних процесів є найважливішим засобом підвищення продуктивності праці, скорочення витрат матеріалів та енергії, поліпшення якості продукції, впровадження прогресивних методів керування виробництвом і підвищення надійності роботи [16].

Автоматичні системи управління можуть бути розроблені на основі досить простих технічних засобів – локальних регуляторів. Однак функціональні

можливості таких систем дуже обмежені. Автоматизувати більш складні функції керування, такі, як оптимізація технологічного процесу чи прийняття рішень при неприпустимих порушеннях у ході технологічного процесу, неможливо без застосування засобів обчислювальної техніки та пристроїв оперативного обміну інформацією між виробничим персоналом і технічними засобами [16].

У зв'язку з цим стали широко застосовуватися автоматизовані системи керування (АСУ). Вони призначені як для керування технологічними процесами, так і для організаційного управління підприємствами. Автоматичні системи керування, що здатні функціонувати без участі людини, відрізняються від автоматизованих систем керування тим, що в другому випадку передбачена участь людського фактору (адміністративного, виробничо-технічного персоналу та операторів) [16].

## **2.1 Аналіз технологічної схеми процесу сушіння дисперсних матеріалів**

Представлена на рисунку 2.1 технологічна схема для сушіння дисперсних матеріалів обладнана високоточним обладнанням.

Транспортування дисперсного матеріалу з вологістю 0,8 % до завантажувальної тійки ковшового елеватора 2, забезпечується стрічковим конвеєром 1. Ковшовим елеватором з продуктивністю близько 50 тонн дисперсного матеріалу на годину, матеріал підіймається на висоту близько 15 метрів.

До розподільної головки сушильної камери, сушильно-охолоджувальної установки 3, дисперсний матеріал рухаючись по закритому металевому жолобу з верхньої розподільчої тарілки ковшового елеватора.

Входячи, вхідним коробом, матеріал потрапляє в так званий центральний пучок сушильної камери (пучок складається з 6 сушильних труб) установки. Рівномірне розподілення дисперсного матеріалу в кожную із шести труб забезпечується за допомогою спіралі та направляючих ковшів.

Конструкція сушарки обумовлена таким чином, що дисперсний матеріал і сушильний агент рухаються в одному напрямку, тобто в прямотоці.

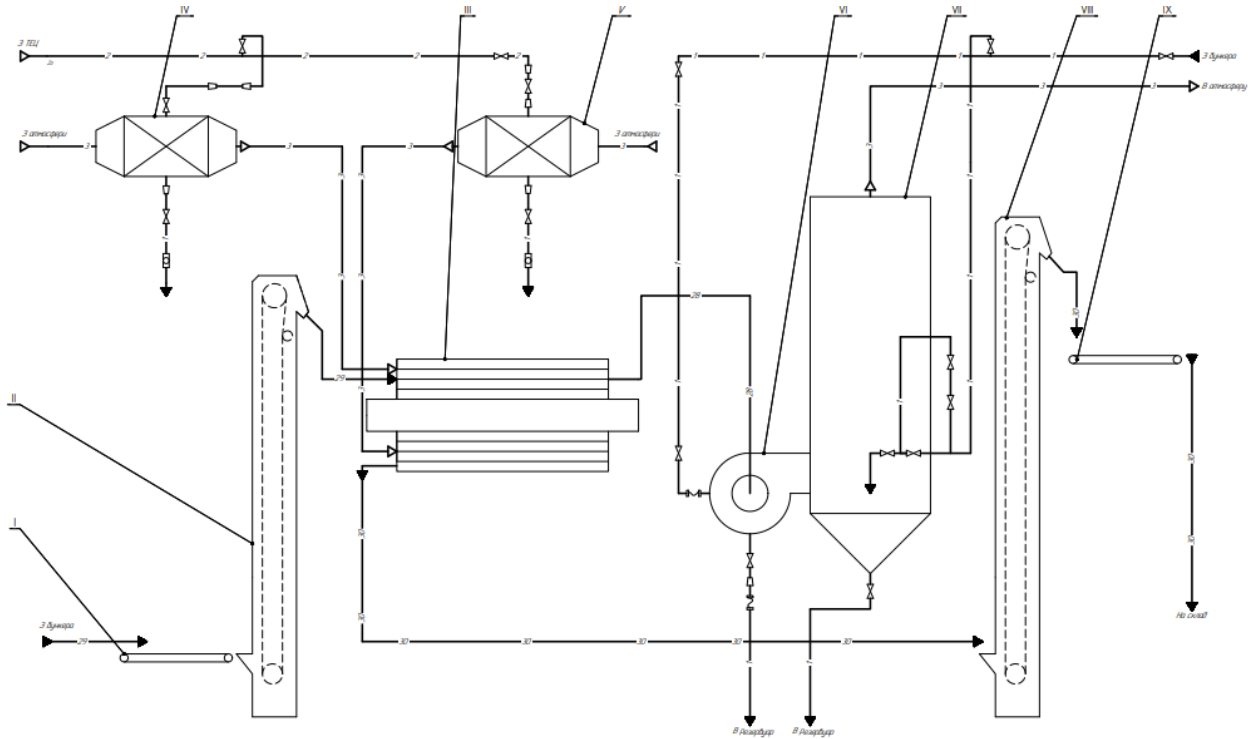


Рисунок 2.1 – Технологічна схема процесу сушіння дисперсних матеріалів з необхідним для роботи обладнанням:

I, IX – стрічковий конвеєр, II, VIII – ковшовий елеватор, III – сушильно-охолоджувальна установка, IV, V – калорифер, VI – вентилятор, VII – скруббер (пиловловлювач)

До пучка охолоджувальних труб дисперсний матеріал потрапляє через з'єднувальні жолоби, котрі з'єднують пучок сушильних і охолоджувальних труб. В охолоджувальній камері матеріал і охолоджувальний агент рухаються в різних напрямках, тобто в протivotці.

Для того щоб запобігти потрапляння разом з сушильним агентом небажаних речовин в місця забору сушильного агента встановленні фільтри, виготовлені зі спеціальної фільтрувальної тканини. На калориферах змонтовані спеціальні пристрої - дозуючі жалюзі, що використовуються для регулювання витрати сушильного агента. Перед тим як потрапити в сушильну камеру сушильний агент нагрівається в паровому калорифері 4, підігрівачим елементом є вторинна пара що генерується на випарній станції. В

охолоджувальну камеру, охолоджувальний агент потрапляє через калорифер 5. Калорифер обладнаний підігрівачем, це обумовлено тим щоб в холодну пору року підтримувати відповідну температуру і вологість охолоджувального агента.

Після проходження сушильного та охолоджувального пучка, змішаний агент (сушильний та охолоджувальний), проходячи через вихідний короб, потрапляє в вузол скрубера (пиловловлювача). Сушильний і охолоджувальний агенти, що надходять через калорифери всмоктується головним вентилятором 6 і одночасно видаляє змішаний агент в скрубер 7. Конструкція вентилятора дозволяє регулювати загальний потік сушильного та охолоджувального за допомогою поворотних лопатей, а внутрішня мийка лопатей очищає лопаті робочого колеса під час роботи.

Трисекційна (секція вихрової промивки, секція накопичення, секція розділення) конструкція скрубера дозволяє значно краще обезпилювати відпрацьований агент. Гази, надходячи в скрубер викликають високу турбулентність впливаючи на рідину, що знаходиться в нижній частині апарату, а також перемішуються між собою. Розчиняючись частинки вловлюються рідиною. Боковий короб переливу дозволяє підтримувати постійний рівень рідини в нижній частині скрубера.

Середовища під сильним взаємовпливом викликають ефект туману, що надходить в секцію розділення. Проходячи через ножовий розділювач краплини, що направлені газом пригальмовуються. Повернення краплин до нижньої частини бункера здійснюється за допомогою дренажного вінця навкруги ножового розподілювача.

Проходячи через балансувальний клапан, висушений та охолоджувальний дисперсний матеріал транспортується в тічку ковшового елеватора для транспортування сухого дисперсного матеріалу 8.

Піднімаючись на висоту близько 16 метрів ковшовим елеватором, матеріал рухаючись по жолобах потрапляє на стрічковий конвеєр 9 і рухається в бункер. Після чого матеріал упаковується і транспортується до місця призначення.

## 2.2 Аналіз сушильно-охолоджувальної установки, як об'єкта керування

Найважливішим фактором підвищення ефективності роботи технологічних комплексів (ТК) є покращення управління, що в свою чергу вимагає використання сучасних технологій при їх автоматизації.

В склад сильно-охолоджувальної установки входить комплекс технологічного обладнання інженерно-технічних засобів, комунікації, пристрої та механізми виконують кожен свою функцію. Завдання системи автоматизації забезпечити необхідний раціонально (оптимальну) взаємодію всього обладнання, що входить в технологічний ланцюг виробничого процесу [17].

Особливості сушильно-охолоджувальної установки як об'єкта керування слідує [17]:

- установка, як система, взаємодіє із зовнішнім середовищем, що реалізується через зовнішні зв'язки (вхідні та вихідні);
- в установці здійснюється перетворення ресурсів на вході на цільові кінцеві результати на виході;
- ефективність роботи установки характеризується відношенням цільових кінцевих результатів до затрат ресурсів на досягнення цих регуляторів та на усунення (або обмеження в допустимому діапазоні) негативних відхилень при вивченні процесу;
- цілеспрямованість процесу сушіння та охолодження дисперсного матеріалу проявляється в можливості підтримувати високу ефективність роботи установки, адаптуючись до змін зовнішнього середовища.

Під змінами зовнішнього середовища ми розуміємо:

- 1) можливі коливання 1,5 % потужності установки по висушеному матеріалу;
- 2) коливання температури зовнішнього агенту для сушіння або охолодження, котра потрапляє через калорифери в установку;
- 3) коливання відносної вологості  $\phi$  атмосферного агенту для сушіння або охолодження;

- 4) коливання температури вологого продукту поступаючого в сушильно-охолоджувальну установку;
- 5) коливання тиску гріючої пари що використовується підігрівачами сушильного або охолоджувального агенту;

Процеси функціонування системи потребують керування, яке реалізується за рахунок цілеспрямованих дій та зворотних зв'язків.

Багатотрубна сушильно-охолоджувальна установка для сушіння та охолодження дисперсних матеріалів має такі спільні характеристики [17]:

- за продуктивністю - високопродуктивна. У промисловості все більше застосовуються апарати (установки) великої одиничної потужності, які можуть замінювати групу апаратів;
- за способом функціонування - неперервна;
- за кількістю виконуваних функцій - багатофункціональна (сушіння дисперсного матеріалу, охолодження висушуваного матеріалу, уловлювання та клерування гарячою водою мілкої пилу в мокрому скрубері);
- за характеристикою середовища - газ та дисперсний матеріал;

Одним із суттєвих недоліків в роботі барабанних сушарок є перетирання висушуваного матеріалу, що має місце при пересипанні і падінні зі значної висоти в барабані. Зазвичай діаметр барабанів досягають 3 і більше метрів в нашому випадку до установки прийнята багатотрубна сушильно-охолоджувальна установка, де матеріал висушується і охолоджується в трубах значно меншого діаметра, що істотно зменшує перетирання матеріалу і його витрати у вигляді мілкодисперсного пилу [17].

В цілому склад сушарки, обладнаної багатотрубною сушильно-охолоджувальною установкою, входить мінімальна кількість технологічного обладнання, що дозволяє повністю автоматизувати виробничий процес. Сама установка працює під невеликим розрідженням створюваним головним вентилятором, що забезпечує потрапляння пилу з сушарки у виробниче приміщення. Таким чином у виробничому корпусі сильного відділення

забезпеченні необхідні санітарні та екологічні вимоги. Відпрацьований змішаний сушильний і озолювальний агенти з сушарки вентилятором нагнітається в мокрий скруббер, де він гарантовано контактує з гарячою водою, що дозволяє повністю очистити змішаний агент від пилу перед викидом його в навколишнє середовище [17].

### **2.3 Аналіз параметрів технологічної схеми**

Для отримання якісного матеріалу під час процесу сушіння дисперсного матеріалу, що відбувається в установці необхідно:

- 1) підтримувати температурний режим;
- 2) створювати потрібне розрідження, щоб необхідна кількість агенту для сушіння та охолодження потрапило до установки.

Контроль витрати та тиску вхідних речовин на фільтрах калориферу виступає одним із важливих факторів.

Порушення будь якого з етапів викликає не якісні характеристики кінцевого матеріалу, що суттєво змінює поведінку матеріалу в подальшому використанні. Отже, потрібно здійснювати контроль всіх параметрів, що беруть участь в технологічному процесі.

Для забезпечення стабільної роботи сушильно-охолоджувальної установки потрібно підтримувати та регулювати наступні параметри:

- 1) витрати сушильного та охолоджувального агенту та пари на калорифери;
- 2) тиск на фільтрах калориферів
- 3) витрату води що подається на скруббер;
- 4) витрату води, яка використовується для промивки лопатей вентилятора;
- 5) температури двигунів: сушильно-охолоджувальної установки, вентилятора, елеватора для подачі матеріалу, та елеватора для транспортування висушеного матеріалу;
- 6) температуру та витрату готової продукції;
- 7) температури води та пари;

Оскільки процес сушіння посідає не останнє місце в вибухонебезпечних процесах, неякісний контроль і регулювання кожного з параметрів може призвести до аварій на виробничих підприємствах, що може обернутися екологічною катастрофою.

## 2.4 Визначення параметрів автоматизації

На підставі аналізу технологічної схеми було визначено необхідний рівень автоматизації виробництва. Параметри контролю, регулювання та автоматизації процесом сушки дисперсних матеріалів занесені до таблиці 2.1

Таблиця 2.1 – Параметри регулювання та контролю процесу сушки дисперсних матеріалів

№	Місце заміру параметру на технологічному об'єкті	Параметр, що вимірюється або регулюється	Норми технологічного режиму та допустимі відхилення	Вимоги до схеми автоматизації
1	Трубопровід подачі сушильного агента на калорифер для сушіння дисперсного матеріалу	Витрата	$25\ 530 \pm 5$ м <sup>3</sup> /год	Контроль, реєстрація, регулювання
2	Трубопровід подачі пари для нагрівання сушильного агента	Витрата	$1686 \pm 5$ м <sup>3</sup> /год	Контроль, реєстрація, регулювання
3	Трубопровід подачі охолоджувального агента на калорифер для охолодження матеріалу	Витрата	$69\ 530 \pm 5$ м <sup>3</sup> /год	Контроль, реєстрація, регулювання
4	Трубопровід подачі води на скруббер та вентилятор	Витрата	$5 \pm 0.5$ м <sup>3</sup> /год	Контроль, реєстрація
5	Трубопровід відпрацьованого змішаного агента	Витрата	$95\ 060 \pm 5$ м <sup>3</sup> /год	Контроль, реєстрація
6	Трубопровід подачі води на скруббер	Витрата	$4 \pm 0.5$ м <sup>3</sup> /год	Контроль, реєстрація
7	Трубопровід подачі пари для нагрівання сушильного агента	Температура	$130 \pm 5$ °С	Контроль і реєстрація
8	Трубопровід подачі охолоджувального агента в охолоджувальну камеру	Температура	$20 \pm 5$ °С	Контроль і реєстрація

## Продовження до таблиці 2.1

9	Трубопровід подачі сушильного агента в сушильну камеру	Температура	$90 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$	Контроль, реєстрація, регулювання, сигналізація
10	Трубопровід подачі охолоджувального агента в охолоджувальну камеру	Температура	$25 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$	Контроль, реєстрація, регулювання, сигналізація
11	Двигун ковшового елеватора подачі вологого дисперсного матеріалу	Температура	$45 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$	Контроль, реєстрація, сигналізація
12	Двигун барабана	Температура	$45 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$	Контроль, реєстрація, сигналізація
13	Редуктор двигуна барабана	Температура	$45 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$	Контроль, реєстрація, сигналізація
14	Двигун вентилятора	Температура	$45 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$	Контроль, реєстрація, сигналізація
15	Фільтр калорифера для нагрівання сушильного агенту	Тиск	$0,095 \pm 0,003 \text{ МПа}$	Контроль, реєстрація
16	Фільтр калорифера для підігріву охолоджувального агента	Тиск	$0,095 \pm 0,003 \text{ МПа}$	Контроль, реєстрація

На випадок виникнення аварій під час процесу сушіння дисперсних матеріалів передбачена можливість дистанційного керування двигунами елеваторів, які подають і забирають матеріал, калориферів, сушильно-охолоджувальної установки, вентилятора.

На основі параметрів обирають технічні засоби автоматизації. Засоби автоматизації підбирають з дотриманням наступних правил:

- для регулювання однакових параметрів технологічного процесу застосовують однотипні засоби автоматизації;
- клас точності приладів повинен відповідати технологічним вимогам;
- діапазон вимірювання приладів повинен відповідати діапазону технологічних параметрів, що регулюються.

Засоби автоматизації вибрані відповідно каталогів [18, 19, 20]. Специфікація до обраних засобів наведена в додатку А.

## **2.5 Опис схеми автоматизації**

Представлена схема автоматизації процесу сушки дисперсних матеріалів дозволяє: контролювати та регулювати витрати, температури, здійснювати контроль тиску, а також обладнана контурами перемикання (рис. 2.1)

### **Контроль та регулювання витрат**

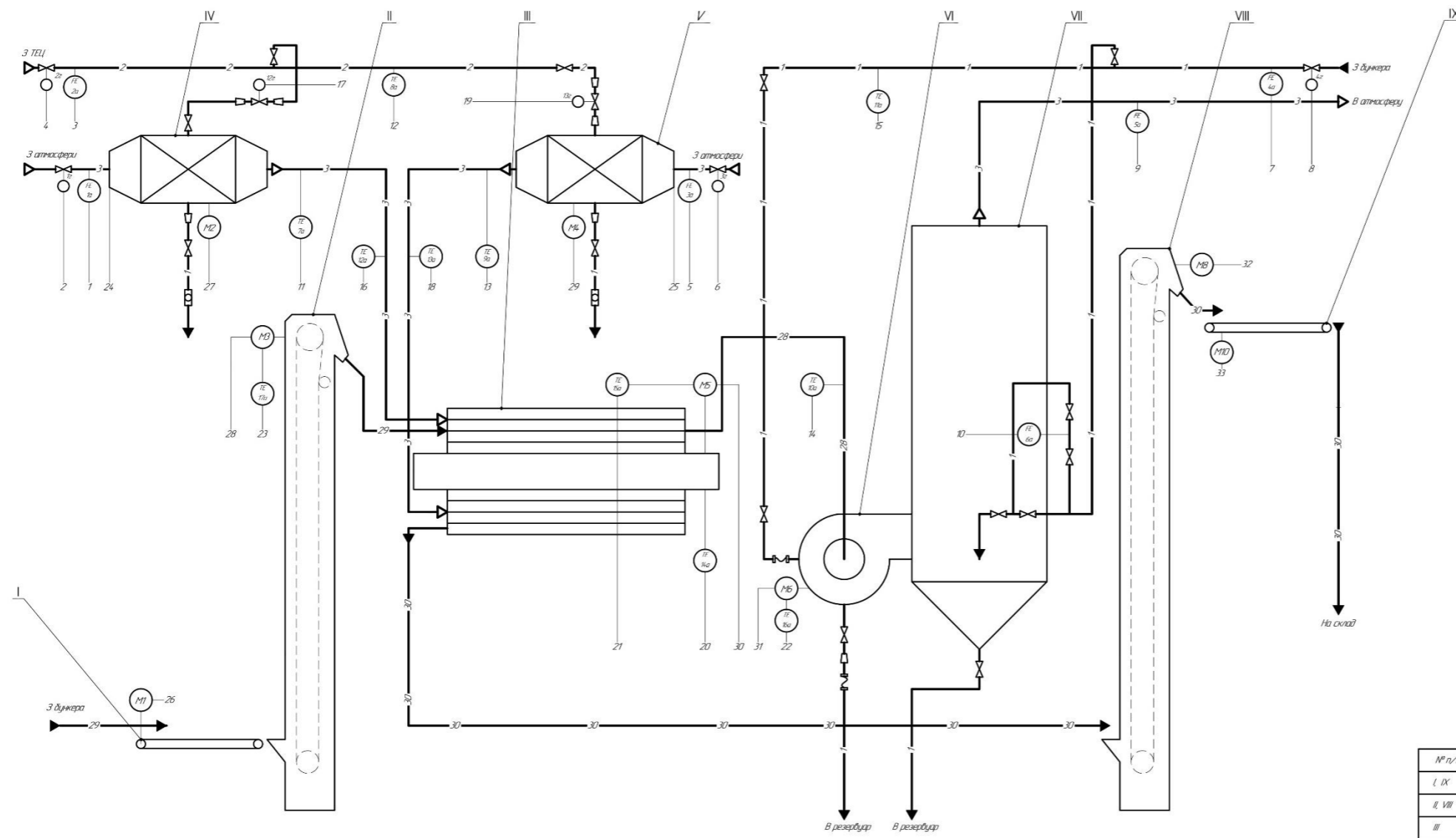
Витрати, контролюються та регулюються за допомогою вихрового витратоміру марки OPTISWIRL 4070 (поз. 1а, 2а, 3а, 4а, 5а, 6а). Прилад обладнаний первинним перетворювачем у вихідний сигнал 4 – 20 мА. Температура вимірюваного середовища даного витратоміру від -40 до 240 °С.

Після проходження первинного перетворювача сигнал подається на аналогово-дискретний перетворювач марки AD9481 (поз. 1б, 2б, 3б, 4б, 5б, 6б), що перетворює сигнал в дискретний і заносить (реєструє) дані в мікроконтролер марки Siemens Simatic S7-300. Після обробки даних контролер, реєструючи складову записує до бази даних для подальшої обробки, а показуючу виводить на екран монітору. Через дискретно-аналоговий перетворювач сигналу (поз. 1в, 2в, 3в, 4в) марки AD9122, мікроконтролер здійснює регулюючий вплив на виконавчий механізм (поз. 1г, 2г, 3г, 4г).

### **Контроль та регулювання температури**

Вимірювання температури здійснюється мідним термоперетворювачем опору марки ТСМ-1088 з токовим виходом (поз. 7а, 8а, 9а, 10а, 11а, 12а, 13а). Прилад здатний вимірювати температуру рідких та газоподібних середовищ з дуже малою похибкою. Це здійснюється за рахунок перетворення опору в уніфікований вихідний сигнал 4 – 20 мА. Діапазон вимірювання температури знаходиться в межах від -50°С – 150°С.

Двигуни, для вимірювання температури обладнані цифровий термометр DS18B20 (поз. 14а, 15а, 16а, 17а). Прилад призначений вимірювати температуру



№ п/п	Найменування технічного устаткування	Кількість
I, IX	Спиральні конвеєри	2
II, VIII	Кабельні елеватори	2
III	Сумішно-охолоджувальна установка	1
IV, V	Колератори	2
VI	Вентилятор	1
VII	Сирдце	1

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33		
Притоки по масі	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100		
Штат адвентивності																																			
Мікроконтролер	Показання	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
	Резервация	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
	Резулдвання	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
	Синхронизация	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	

№ потоку	Найменування потоку
1	Вода
2	Пісок
3	Сумішні та охолоджувальні агенти
28	Агент з частинками дисперсного матеріалу
29	Вологий дисперсний матеріал
30	Сухий дисперсний матеріал

Рисунок 2.2 – Схема автоматизації процесу сушіння дисперсного матеріалу

з вихідним сигналом 4 – 20 мА. Діапазон вимірювання температури знаходиться в межах від -20°C – 400°C.

Перетворення сигналу з аналогового на дискретний здійснюється аналогово-дискретним перетворювачем марки AD9481 (поз. 7б, 8б, 9б, 10б, 11б, 12б, 13б, 14б, 15б, 16б, 17б), що перетворює сигнал в дискретний і заносить (реєструє) дані в мікроконтролер марки Siemens Simatic S7-300. Після обробки даних контролер, реєструючи складову записує до бази даних для подальшої обробки, а показуючу виводить на екран монітору. Через дискретно-аналоговий перетворювач сигналу (поз. 12в, 13в) марки AD9122, мікроконтролер здійснює регулюючий вплив на виконавчий механізм (поз. 1г, 2г, 3г, 4г). Для запобігання аварій деякі контури обладнані сигнальними лампами з червоними індикаторами марки AD16-16E.

### **Контроль тиску**

Тиск, вимірюється за допомогою первинного перетворювача марки WKA. Прилад здатний вимірювати тиск рідких та газоподібних середовищ з вихідним сигналом 0 – 20 мА. Діапазон вимірювання тиску лежить в межах 0 до 0,16 МПа.

Після проходження первинного перетворювача сигнал подається на аналогово-дискретний перетворювач марки AD9481 (поз. 18а, 19а), що перетворює сигнал в дискретний і заносить (реєструє) дані в мікроконтролер марки Siemens Simatic S7-300. Після обробки даних контролер, реєструючи складову записує до бази даних для подальшої обробки, а показуючу виводить на екран монітору.

### **Контур перемикання**

На випадок аварій різного роду передбачено дистанційне регулювання двигунами (контр. 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33).

Пост керування оператора обладнаний кнопками керування марки ПКУ 15-21- 131-УЗ та магнітними пускачами ПМ12- 160210У2В.

Сигналізація верхнього та нижнього рівня обладнана індикаторними лампами марки AD16-16E (поз. HL3, HL4, HL5, HL6, HL7, HL8, HL9, HL10, HL11, HL12, HL13, HL14, , HL15, HL16, HL17, HL18).

### **Висновки**

Розроблена схема автоматизації для сушіння дисперсних матеріалів, що використовує новітнє обладнання. Засоби автоматизації підібрані згідно технологічного регламенту. Схема обладнана контролером для зчитування інформації, реєстрації і контролю. На випадок аварій система або частково вимикається або повністю завершує роботу на деякий час.

## **3 РОЗРОБКА ДИНАМІЧНОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ БАГАТОТРУБНОЇ СУШИЛЬНО-ОХОЛОДЖУВАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ**

Математичне моделювання технологічних процесів, це процес побудови математичної моделі, об'єктом якої є технологічний процес чи його складові, і яка призначена для вирішення конкретних практичних задач [21]:

- 1) розроблення нових технологічних процесів чи вдосконалення існуючих;
- 2) визначення та/або прогнозування характеристик чи показників технологічного процесу або його результатів, які неможливо чи економічно недоцільно визначити в реальних умовах;
- 3) навчальні чи демонстраційні моделі, які надають можливість візуального представлення реальних процесів і явищ, що являють собою чи супроводжують технологічні процеси або окремі його складові;
- 4) імітаційні моделі які дозволяють візуалізувати технологічні процеси чи їх елементи, та які призначені для реклами, розваг, популярних телепередач тощо.

### **3.1 Аналіз режимних параметрів установки**

Всі технологічні процеси, що здійснюються на підприємствах характеризуються низкою параметрів. Всі параметри можна об'єднати в три групи: вхідні, режимні, вихідні [22].

Вхідні та вихідні параметри характеризують енергетичні та матеріальні потоки на вході в апарат та виході з нього (витрати сировини, склад готового продукту) [22].

В свою чергу режимні параметри дають уявлення про умови протікання процесу в апараті. По своїй фізичній суті сушіння дисперсних матеріалів являється складним дифузійним процесом, швидкість якого визначається швидкістю дифузії вологи з глибини висушуваного матеріалу в навколишнє

середовище. Видалення вологи при сушінні зводиться до переміщення тепла і речовини (вологи) всередині матеріалу та їх переносу з поверхні матеріалу в навколишнє середовище.

Таким чином, процес сушіння являється поєднанням пов'язаних між собою процесів тепло – і масообміну. Оскільки процес сушіння має двоякий характер (з однієї сторони – це теплообмінний процес, з іншої – масообмінний), то мають місце дві рухомі сили цього процесу [22]:

1. Для масообмінного процесу – різниця парціальних тисків (концентрацій водяної пари на поверхні матеріалу  $P_m$  і в навколишньому середовищі  $P_c$ ).

2. Для теплообмінного процесу – різниця температур сушильного агента (температура сухого термометра  $t$ ) і поверхні матеріалу (температура мокрого термометра  $t_m$ ), яка називається потенціалом сушки.

В нашому випадку особливістю прийнятої для сушіння установки є обов'язкове охолодження до регламентованих параметрів висушуваного матеріалу [21].

Основні режимні параметри для сушильно-охолоджувальної установки представляємо в порівняльній таблиці [22, 23].

Таблиця 3.1 - Режимні параметри сушильно-охолоджувальної установки

№	Змінні	Значення	Допустимі відхилення
1.	Продуктивність	13,889 кг/с	± 1,5 %
2.	Вологість дисперсного матеріалу перед сушаркою	0,8 %	± 0,05 %
3.	Вологість висушеного матеріалу	0,05 %	± 0,02 %
4.	Температура вологого матеріалу	60 °C	± 2 °C
5.	Температура сушильного та охолоджувального агента перед калорифером	20 °C	± 5 °C

## Продовження до таблиці 3.1

6.	Відносна вологість сушильного агента	65 %	$\pm 10 \%$
7.	Температура підігрітого сушильного агента після калорифера	90 °C	$\pm 5 \text{ °C}$
8.	Температура висушеного та охолодженого матеріалу	25 °C	$\pm 5 \text{ °C}$
9.	Тиск гріючої пари, поступаючої на калорифери	0,233 МПа	$\pm 0,01 \text{ МПа}$

Отже, при створенні системи адаптивного керування (САК) неможливо врахувати всі вхідні параметри об'єкта управління, що впливають на хід технологічного процесу.

### 3.2 Математичне забезпечення для системи адаптивного керування

Математичне моделювання технологічних процесів — процес побудови математичної моделі, об'єктом якої є технологічний процес чи його складові, і яка призначена для вирішення конкретних практичних задач [24]:

- 1) розроблення нових технологічних процесів чи вдосконалення існуючих;
- 2) визначення та/або прогнозування характеристик чи показників технологічного процесу або його результатів, які неможливо чи економічно недоцільно визначити в реальних умовах;
- 3) навчальні чи демонстраційні моделі, які надають можливість візуального представлення реальних процесів і явищ, що являють собою чи супроводжують технологічні процеси або окремі його складові;
- 4) імітаційні моделі які дозволяють візуалізувати технологічні процеси чи їх елементи, та які призначені для реклами, розваг, популярних телепередач тощо;

Виходячи з того, що сушильна установка складається з сушильної та охолоджувальної камери, математичні моделі будуть підбиратися для двох камер.

*Для сушильної камери зроблено наступні припущення [24]:*

- 1) потік повинен рівномірно розподілитися по всьому об'єму що займає теплоносій;
- 2) швидкість передачі вологи від матеріалу до сушильного агенту постійна;
- 3) все тепло, що виділяється в процесі передачі від сушильного агенту до поверхні вологого матеріалу витрачається на випарювання вологи з дисперсного матеріалу;
- 4) щільність та теплоємність постійні в області робочих температур;
- 5) витрати теплоти, що надходять в навколишнє середовище не враховуються;

*Для охолоджувальної камери зроблено наступні припущення [24]:*

- 1) витрати теплоти, що надходять в навколишнє середовище не враховуються;
- 2) коефіцієнт тепловіддачі вважається постійним по всій поверхні теплообміну
- 3) матеріал і теплоносій рухається в режимі ідеального перемішування;

### **3.2.1 Розрахунок матеріальних та теплових балансів**

Матеріальні баланси конкретизують основну таблицю балансу суспільного продукту і доводять планування найзагальніших пропорцій відтворення, що відображаються в балансі суспільного продукту, до планування пропорцій щодо виробництва і споживання конкретної продукції.

Розрахунки матеріального балансу виконувались в програмному середовищі MathCAD 2015.

Для визначення кількості видаляємої вологи з матеріалу роботи складемо матеріальний баланс [25]:

$$W = G_{sm} - G_{fm}, \text{ кг вологи} \quad (3.1)$$

де  $G_{sm}$  – маса дисперсного матеріалу перед входом в сушильно-охолоджувальну установку, кг/с,  $G_{fm}$  – маса дисперсного матеріалу після

висушування кг/с.

Матеріальний баланс можна виразити наступним рівнянням [25]:

$$G_{sm} = G_{fm} \cdot \frac{100 - \omega_{fm}}{100 - \omega_{sm}}, \text{ кг} \quad (3.2)$$

де  $\omega_{sm}, \omega_{fm}$  – початкова і кінцева вологість матеріалу відповідно, %.

По I-х діаграмі знайдемо вологовміст сушильного агента на вході в калорифер і на виході з нього. Складемо матеріальний баланс по волозі [23]:

$$L \cdot x_0 + W = L \cdot x_1 \quad (3.3)$$

де  $L$  – витрати сушильного агента, кг/с,  $x_0, x_1$  – визначені вологовмісти перед калорифером і після нього відповідно, кг вологи/ кг сухого матеріалу.

Визначимо витрату сушильного агента для сушіння [25]:

$$L = \frac{W}{x_0 - x_1}, \text{ кг} \quad (3.4)$$

Витрата охолоджувального агента для охолоджувальної камери [23]:

$$L = \frac{0,25 \cdot (t_{m2} - t_{m1})}{(0,24 + 0,47 \cdot \frac{d_0}{1000}) \cdot (t_{a2} - t_{a1})} \quad (3.5)$$

де  $t_{m1}, t_{m2}$  – температура дисперсного матеріалу охолодженням і після охолодження відповідно,  $t_{a1}, t_{a2}$  – температура охолоджувального агента після охолодження і перед охолодженням,  $d_0$  – вологовміст охолоджувального агента перед охолодженням.

**Матеріальний баланс виражається рівняннями:**

1. По всьому матеріалу, що підлягає висушуванню:

$$G_s = G_f + W$$

2. По абсолютно сухій речовині в висушуваному матеріалі:

$$G_s = \frac{100 - \omega_s}{100} = G_f \cdot \frac{100 - \omega_f}{100}$$

$$G_s := G_f \cdot \frac{100 - \omega_f}{100 - \omega_s} = 13.994$$

*Метою складання матеріального балансу є визначення маси вологи  $W$ , що видаляється при сушінні матеріалу*

3. Маса вологи, виділеної з матеріалу при сушінні  $W := G_s - G_f = 0.105$

Рисунок 3.1 – Фрагмент розрахунку матеріального балансу в MathCAD

Зроблений перерахунок дозволяє більш зручно представити витрати

сушильного та охолоджувального агентів для сушіння та охолодження дисперсного матеріалу з кг/год на м<sup>3</sup>/год.

Перерахунок сушильного агенту який витрачається для сушіння дисперсного матеріалу:

- 1) витрата сушильного агенту, що використовується для сушіння матеріалу – 25 200 кг/год
- 2) густина сушильного агенту при температурі 20 °С – 0,987 кг/м<sup>3</sup>
- 3) об'ємна витрата сушильного агенту, що використовується для сушіння матеріалу [23]:

$$V_{\text{пов}} = \frac{25\,200}{0,987} = 25\,530 \text{ м}^3/\text{год}$$

Перерахунок охолоджувального агенту який використовується для охолодження дисперсного матеріалу:

- 1) витрата охолоджувального агента для охолодження – 68 620 кг/год
- 2) густина охолоджувального агенту при температурі 20 °С – 0,987 кг/м<sup>3</sup>
- 3) об'ємна витрата охолоджувального агенту, що використовується для охолодження матеріалу становить [25]:

$$V_{\text{пов}} = \frac{68\,620}{0,987} = 69\,530 \text{ м}^3/\text{год}$$

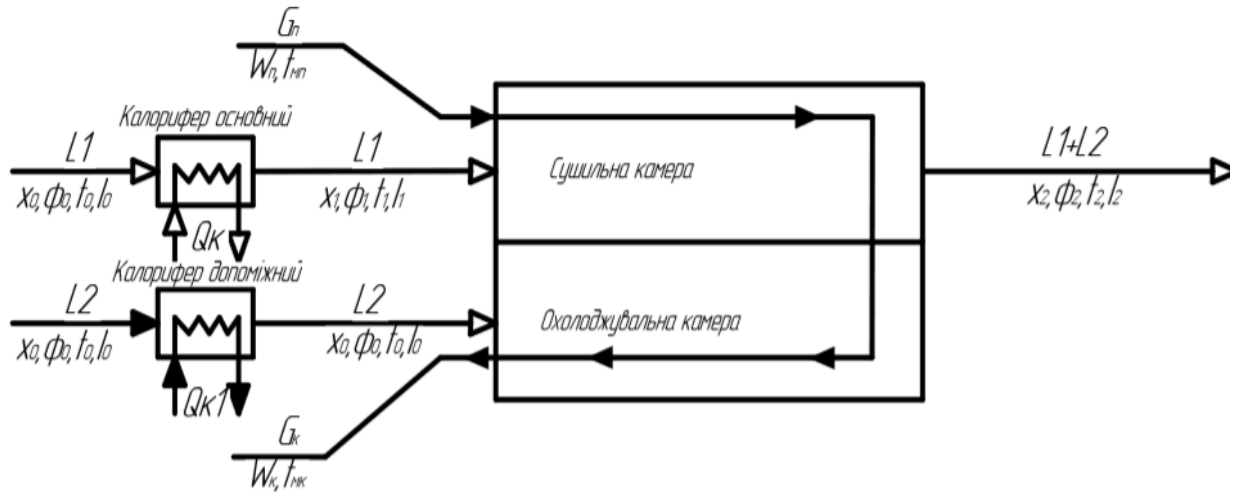
Таблиця 2.3 – Матеральний баланс

Вхід	Вихід
Вологий дисперсний матеріал $G_{sm} = 50\,378,4 \text{ кг/год}$	Сухий дисперсний матеріал $G_{fm} = 50\,000 \text{ кг/год}$
	Волога $W = 378,4 \text{ кг/год}$
Сума 50 378,4 кг/год	Сума 50 378,4 кг/год

Згідно розрахункової таблиці можна зробити висновок, що матеріальний баланс розраховано вірно. Розрахунки виконані в програмному середовищі MathCAD та представлені в додатку Б.

### 3.2.2 Розрахунок матеріальних та теплових балансів

Тепловий баланс розраховується виходячи з принципової схеми [25]. Тепловий баланс проводиться з метою визначення кількості пари, яка буде поступати на калорифери для підігріву сушильного агента:



Рисисунок 3.2 – Принципова схема конвективної сушарки

Дисперсний матеріал надходить матеріал з початковою температурою  $T_{sm} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , витратою  $G_{sm} = 13,966\text{ кг/с}$ . В процесі сушіння випарюється вологи  $W = 0,077\text{ кг/с}$ , і виходить із сушарки матеріал з температурою  $T_{fm} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$  та витратою  $G_{fm} = 13,889\text{ кг/с}$ .

- 1) Питома теплоємність дисперсного матеріалу  $c_m = 1\,550\text{ Дж/(кг}\cdot^{\circ}\text{C)}$ .
- 2) Питома теплоємність вологи (води)  $c_w = 4\,190\text{ Дж/(кг}\cdot^{\circ}\text{C)}$ .

Для сушіння дисперсного матеріалу використовується  $L_1 = 7,001\text{ кг/с}$  сушильного агента, а для охолодження  $L_2 = 17,023\text{ кг/с}$

Ентальпія визначається за допомогою I-d діаграми [23].

Ентальпія сушильного та охолоджувального агентів перед калорифером  $I_0 = 47\,000\text{ Дж/кг}$ . Ентальпія змішаного агента  $I_2 = 113\,000\text{ Дж/кг}$ .

Згідно схеми тепло  $Q_{fm}$  підводиться в калорифер встановлений перед сушильною установкою [25].

Тепловий баланс сушильної установки наведений в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Тепловий баланс

Вхід	Вихід
З сушильним агентом $L_1 \cdot I_0 = 329\,023,7$ Дж	З відпрацьованим змішаним агентом $(L_1 + L_2) \cdot I_2 = 2\,714\,731,7$ Дж
З охолоджувальним агентом $L_2 \cdot I_0 = 800\,112,5$ Дж	З висушеним матеріалом $G_{fm} \cdot c_m \cdot T_{fm} = 538\,198,7$ Дж
З вологим матеріалом, в тому числі з абсолютно сухим матеріалом $G_{fm} \cdot c_m \cdot T_{sm} = 1\,291\,677$ Дж	Витрати тепла в атмосферу $Q_{втр} = 51\,428,8$ Дж
В основному калорифері $Q_k = 857\,147$ Дж	
З вологою що випаровується з матеріалу $W \cdot c_w \cdot T_{sm} = 26\,398,9$ Дж	
Сума: 3 304 359,3 Дж	Сума: 3 304 359,3 Дж

Тепловий баланс процесу сушіння можна виразити наступним рівнянням [25]:

$$L_1 \cdot I_0 + L_2 \cdot I_0 + G_{sm} \cdot c_m \cdot T_{sm} + W \cdot c_w \cdot T_{sm} + Q_k = (L_1 + L_2) \cdot I_2 + G_{fm} \cdot c_m \cdot T_{fm} + Q_{втр} \quad (3.5)$$

З цього рівняння визначаємо загальну витрату тепла  $Q_k$  на сушку. Витрати тепла в навколишнє середовище становлять 6% [5].

$$Q_k - 0,06 \cdot Q_k = (L_1 + L_2) \cdot I_2 + G_{fm} \cdot c_m \cdot T_{fm} - L_1 \cdot I_0 - L_2 \cdot I_0 - G_{sm} \cdot c_m \cdot T_{sm} - W \cdot c_w \cdot T_{sm} \quad (3.6)$$

Отже:

$$Q_k = \frac{(L_1 + L_2) \cdot I_2 + G_{fm} \cdot c_m \cdot T_{fm} - L_1 \cdot I_0 - L_2 \cdot I_0 - G_{sm} \cdot c_m \cdot T_{sm} - W \cdot c_w \cdot T_{sm}}{0,94} =$$

$$= 857\,147 \text{ Дж/с}$$

Для знаходження витрат пару на калорифер використаємо формулу [25]:

$$D = \frac{Q_k}{i - t_c} \quad (3.7)$$

де  $i$  – теплоємність, яка визначається по таблицях Вакуловича [23],  $t_c$  – температура конденсату.

$$D = \frac{857\,147}{648,3 - 124} = 1686 \text{ кг/год}$$

Згідно розрахункової таблиці можна зробити висновок, що тепловий баланс розраховано вірно.

### 3.2.3 Математична модель для сушильної камери

Запишемо рівняння збереження енергії для сушильного агенту. Вихідними величинами для даного рівняння є тепловий баланс для часу  $t$

$$\Delta Q_m = \Delta Q_a = M_a \cdot (h_1 - h_2), \quad (3.8)$$

де  $\Delta Q_m$ ,  $\Delta Q_a$  – теплота, яка сприймається матеріалом та яка віддана сушильним агентом;  $M_a$ ,  $h$  – маса та ентальпія сушильного агенту відповідно.

Виходячи з того, що динамічна математична модель відтворює зміну об'єкта, яка відбувається з плином часу, за законом Ньютона–Ріхмана для конвективної теплопередачі запишемо рівняння для проміжку часу  $dt$ .

$$\Delta Q_m = \alpha_{am} \cdot F_m \cdot \left( \frac{T_{1a} + T_{2a}}{2} - \frac{T_{1m} + T_{2m}}{2} \right) dt, \quad (3.9)$$

де  $\alpha_{am}$  – коефіцієнт тепловіддачі від сушильного агенту до матеріалу;  $F_m$  – поверхня матеріалу;  $T_m$  – температура матеріалу,  $T_a$  – температура сушильного агенту.

Запишемо рівняння яке відобразить яку кількість теплоти віддасть сушильний агент:

$$\Delta Q_a = (M_a + dM_a) \cdot [h_1 - (h_2 - dh_2)], \quad (3.10)$$

де  $dM_a$  – являється приростом сушильного агенту за проміжок часу  $dt$ ,  $dh_2$  – зміна ентальпії сушильного агенту відповідно.

Для отримання рівняння теплового балансу, підставимо рівняння конвективної теплопередачі в рівняння кількості теплоти яку віддає сушильний агент та поділивши його на  $dt$  отримаємо:

$$M_a \frac{dh_2}{dt} = L_a \cdot h_2 - L_a \cdot h_1 + \alpha_{am} \cdot F_m \cdot \left( \frac{T_{1a} + T_{2a}}{2} - \frac{T_{1m} + T_{2m}}{2} \right), \quad (3.11)$$

де  $L_a = \frac{dM_a}{dt}$  – витрати сушильного агенту.

Запишемо рівняння збереження маси для вологи в повітрі. Враховуючи те що за час  $dt$  вологість матеріалу зміниться  $d\omega_2$ , вологість сушильного агенту  $dd_2$ , отримаємо рівняння збереження маси:

$$M_m \cdot d\omega_2 = M_a \cdot dd_2, \quad (3.12)$$

$$\frac{dd_2}{dt} = \frac{M_m}{M_a} \cdot \frac{d\omega_2}{dt}, \quad (3.13)$$

Для отримання рівняння збереження енергії для матеріалу, вихідним для цього випадку є рівняння теплового балансу для часу  $t$ . З плином часу  $dt$  температура матеріалу  $T_{2m}$  змінюється на величину  $dT_{2m}$ :

$$c_m \cdot M_m \cdot \frac{dT_{2m}}{dt} = \alpha_{am} \cdot F_m \cdot \left( \frac{T_{1a} + T_{2a}}{2} - \frac{T_{1m} + T_{2m}}{2} \right), \quad (3.14)$$

де  $c_m$  - теплоємність матеріалу.

Вихідним рівнянням для отримання рівняння збереження маси для вологи в матеріалі є:

$$\Delta W_c = \Delta W_m, \quad (3.15)$$

де  $\Delta W_c$ ,  $\Delta W_m$  - кількість видаленої вологи в процесі сушіння та зміна кількості вологи в матеріалі.

Величину  $\Delta W_c$  визначимо з рівняння теплового балансу для часу  $t$ :

$$k \cdot F_m \cdot (\omega_2 - \omega_p) = -M_m d\omega_2 \text{ або } -M_m \cdot \frac{d\omega_2}{dt} = k \cdot F_m \cdot (\omega_2 - \omega_p) \quad (3.16)$$

де  $k$  – коефіцієнт сушіння,  $\omega_p$  – рівноважна вологість.

Запишемо рівняння приросту маси матеріалу має вигляд:

$$\frac{dM_m}{dt} = L_m \quad (3.17)$$

де  $dM_m$  являється приростом маси дисперсного матеріалу протягом проміжку часу  $dt$ ,  $L_m$  – витрата матеріалу відповідно.

В рівнянні теплового балансу є ентальпія  $h_2$ . Визначаємо  $h_2$  за допомогою рівняння збереження маси для вологи в сушильному агенті:

$$h = 1,004 \cdot t + 2500 \cdot d \cdot 1,84 \cdot t \quad (3.18)$$

Тоді

$$h_1 = 1,004 \cdot T_{1a} + 2500 \cdot d_1 \cdot 1,84 \cdot T_{1a} \quad (3.19)$$

$$h_2 = 1,004 \cdot T_{2a} + 2500 \cdot d_2 \cdot 1,84 \cdot T_{2a} \quad (3.20)$$

Продиференціювавши  $h_2$  отримаємо:

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{dT_{2a}}{dt} \cdot (1,004 + 1,84 \cdot d_2) + 2500 \cdot \frac{dd_2}{dt} + 1,84 \cdot \frac{dd_2}{dt} T_{2a} \quad (3.21)$$

Прирівнявши рівняння теплового балансу до продиференційованого  $h_2$  отримаємо:

$$\frac{dT_{2a}}{dt} = \frac{1}{1,004+1,84d_2} \cdot \left[ \frac{L_a}{M_a} (1,004 \cdot T_{2a} + d_2 \cdot 2500 + T_{2a} \cdot d_{2a} \cdot 1,84) - \frac{L_m}{M_m} h_1 + \right. \\ \left. + \frac{\alpha_{am} \cdot F_m}{M_a} \left( \frac{T_{1a} + T_{2a}}{2} - \frac{T_{1m} + T_{2m}}{2} \right) - 2500 \frac{dd_2}{dt} - 1,84 \frac{dd_2}{dt} t_{2a} \right] \quad (3.21)$$

Отже математична модель для сушильної камери буде мати наступний вигляд:

$$\begin{cases} \frac{dT_{2a}}{dt} = \frac{1}{1,004+1,84d_2} \cdot \left[ \frac{L_a}{M_a} (1,004 \cdot T_{2a} + d_2 \cdot 2500 + T_{2a} \cdot d_{2a} \cdot 1,84) - \frac{L_m}{M_m} h_1 + \right. \\ \left. + \frac{\alpha_{am} \cdot F_m}{M_a} \left( \frac{T_{1a} + T_{2a}}{2} - \frac{T_{1m} + T_{2m}}{2} \right) - 2500 \frac{dd_2}{dt} - 1,84 \frac{dd_2}{dt} t_{2a} \right] \\ \frac{dd_2}{dt} = \frac{M_m}{M_a} \frac{d\omega_2}{dt} \\ \frac{d\omega_2}{dt} = -\frac{k \cdot F_m}{M_m} (\omega_2 - \omega_p) \\ \frac{dT_{2m}}{dt} = \frac{\alpha_{am} \cdot F_m}{c_m \cdot M_m} \left( \frac{T_{1a} + T_{2a}}{2} - \frac{T_{1m} + T_{2m}}{2} \right) \end{cases} \quad (3.22)$$

Для визначення полегшення подальшого розрахунку математичної моделі введемо наступні позначення:

$$10^{-3} \cdot \frac{\alpha_{am} F_m}{2M_a} = A, \frac{L_a}{M_a} = B, \frac{kF_m}{M_m} = C, \frac{\alpha_{am} F_m 10^{-3}}{c_m M_m^2} = D,$$

Після всіх перетворень рівняння набуде вигляду

$$\frac{dT_{2a}}{dt} = \frac{1}{1,004+1,84d_2} \cdot \left[ B(1,004 \cdot T_{2a} + d_2 \cdot 2500 + T_{2a} \cdot d_{2a} \cdot 1,84) - Bh_1 + \right. \\ \left. + 2A \left( \frac{T_{1a} + T_{2a}}{2} - \frac{T_{1m} + T_{2m}}{2} \right) + 2500 \frac{dd_2}{dt} - 1,84 \frac{dd_2}{dt} T_{2a} \right] \quad (3.23)$$

Для простоти введемо наступні позначення:

$x_1 = T_{2a}$  – кінцева температура повітря;  $x_2 = d_2$  – кінцева вологість сушильного агенту;  $x_3 = W_{2m}$  – кінцева вологість матеріалу;  $x_4 = T_{2m}$  – кінцева температура матеріалу;

Використовуючи всі перетворення запишемо систему математичних рівнянь конвективного сушіння для сушильної камери у вигляді:

$$\begin{cases} x_1' = \frac{1}{1,004+1,84x_2} \cdot \left[ E(1,004x_1 + 2500x_2' + 1,84x_1x_2) - Eh + \right. \\ \left. 2A \left( \frac{T_{1a} + x_1}{2} - \frac{T_{1m} + x_4}{2} \right) + 2500x_2' - 1,84x_2'x_1 \right] \\ x_2' = \frac{M_m}{M_a} x_3' \\ x_3' = -Cx_3 + CW_p \\ x_4' = DT_{1a} + Dx_1 + DT_{1m} - Dx_4 \end{cases} \quad (3.24)$$

Введемо початкові умови:

$$x_1 = T_{1a}; x_2 = d_1; x_3 = W_1; x_4 = T_{1m};$$

Для перевірки правильності роботи моделі і для отримання подальших даних для розробки програмного продукту, математична модель розраховувалась в середовищі MathCAD 2015, методом Рунге-Кутта 4 порядку.

3. Спрощення формул математичної моделі через заміни

$$A_{\text{koef}} := \frac{\alpha_{\text{am}} \cdot F_{\text{m}}}{2 \cdot M_{\text{a}}} = 0.042 \quad B_{\text{koef}} := \frac{K_{\text{d}} \cdot F_{\text{m}}}{M_{\text{m}}} = 5.792 \times 10^{-3}$$

$$C_{\text{koef}} := \frac{\alpha_{\text{am}} \cdot F_{\text{m}}}{2 \cdot c_{\text{m}} \cdot M_{\text{m}}} = 1.383 \times 10^{-5} \quad D_{\text{koef}} := \frac{L_{\text{a}}}{M_{\text{a}}} = 1.111 \times 10^{-3}$$

$$f(t, x) := \begin{bmatrix} \frac{1}{1.004 + 1.84 x_2} \left[ D_{\text{koef}} (x_1 + 2500 x_2 + 1.84 x_1 x_2) - D_{\text{koef}} h_1 - 2 A_{\text{koef}} \left( \frac{T_{1a} + x_1}{2} - \frac{T_{1m} + x_4}{2} \right) + 2500 \left[ \frac{M_{\text{m}}}{M_{\text{a}}} (B_{\text{koef}} x_3 + B_{\text{koef}} W_r) \right] - 1.84 x_1 \left[ \frac{M_{\text{m}}}{M_{\text{a}}} (B_{\text{koef}} x_3 + B_{\text{koef}} W_r) \right] \right] \\ \frac{M_{\text{m}}}{M_{\text{a}}} (B_{\text{koef}} x_3 + B_{\text{koef}} W_r) \\ - B_{\text{koef}} x_3 + B_{\text{koef}} W_r \\ C_{\text{koef}} T_{1a} - C_{\text{koef}} x_1 - C_{\text{koef}} T_{1m} - C_{\text{koef}} x_4 \\ L_{\text{m}} \\ L_{\text{a}} \end{bmatrix}$$

$$J := \text{rkfixed}(x0, 0, 900, 100, f)$$

Рисунок 3.3 – Фрагмент розрахунку математичної моделі для сушильної камери методом Рунге-Кутта.

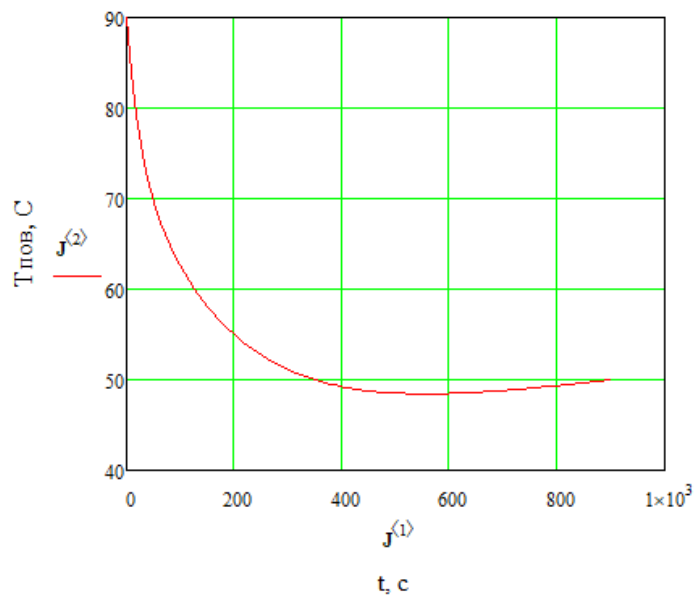


Рисунок 3.4 – Крива зміни температури сушильного агенту

Графік показує зміну температури сушильного агента з плином часу.  
Результати потрібні контролю та реєстрації зміни температури.

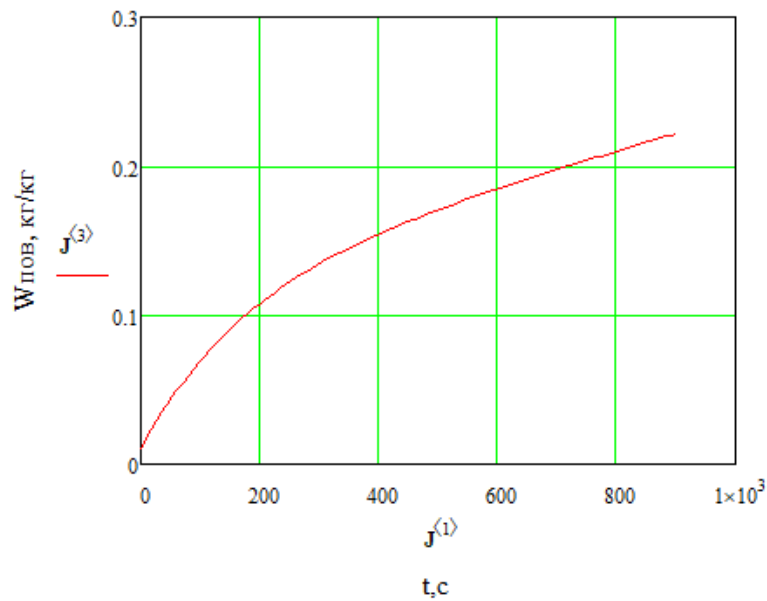


Рисунок 3.5 – Крива зміни вологості сушильного агента

Графік показує як повітря переймає вологу від сушильного матеріалу.

Для подальшого розрахунку і моделювання адаптивної системи потрібно спостерігати зміни на наступних графіках (рис. 3.6, рис. 3.7). Графіки показують зміну вологості матеріалу і зміну його температури.

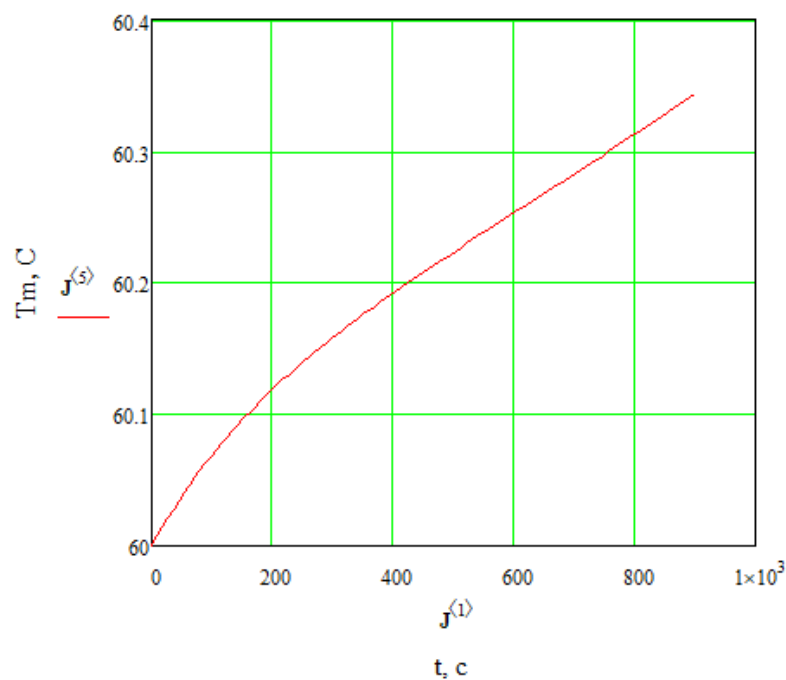


Рисунок 3.6 – Крива зміни температури дисперсного матеріалу

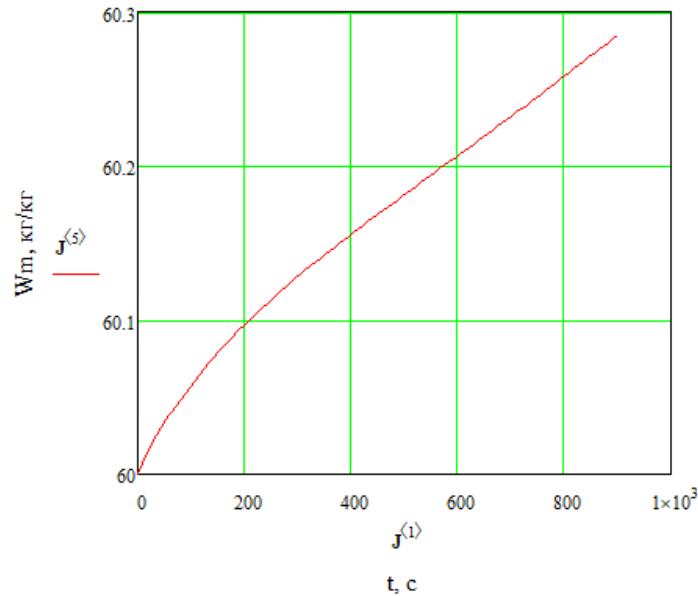


Рисунок 3.7 – Крива зміни вологості дисперсного матеріалу

Розрахунок математичної моделі для сушильної камери проведене в програмному середовищі MathCAD. Розрахунки представлені в додатку В.

### 3.2.4 Математична модель для охолоджувальної камери

Для розрахунку охолоджувальної камери обираємо модель ідеального перемішування [22]:

$$\begin{cases} V_1 \cdot c_{T1} \cdot \frac{dT_1}{dt} = -v_1 \cdot c_{T1} \cdot (T_{1s} - T_1) + F \cdot K \cdot (T_1 - T_2) \\ V_2 \cdot c_{T2} \cdot \frac{dT_2}{dt} = \pm v_2 \cdot c_{T2} \cdot (T_{2s} - T_1) + F \cdot K \cdot (T_1 - T_2) \end{cases} \quad (3.25)$$

де  $V_1, V_2$  – площі поперечних перерізів, що займають теплоносії,  $m^2$ ;  $c_{T1}, c_{T2}$  – теплоємності теплоносіїв,  $Дж/м^3 \cdot ^\circ C$ ;  $T_1, T_2$  – охолоджувального агента та матеріалу,  $^\circ C$ ,  $K$  – коефіцієнт тепловіддачі,  $Дж/м^2 \cdot год \cdot ^\circ C$ ,  $v_1, v_2$  – швидкості руху речовин,  $м^3 год$ ,  $t$  – координата часу, год.

Рівняння розраховують розподіл теплоносіїв з плином часу по охолоджувальній камері, а також температуру кожного теплоносія на виході із апарату.

Для знаходження коефіцієнта тепловіддачі можна скористатись рівнянням [24]:

$$K = B \cdot \frac{(\rho \cdot v)^{0,8}}{d^{0,2}} \frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C} \quad (3.26)$$

де  $B$  – коефіцієнт (знаходиться по таблиці [24] ),  $\rho$  – густина охолоджувального агенту,  $v$  – швидкість охолоджувального агенту,  $d$  – діаметр труби.

Після того як зроблений конструктивний розрахунок, виконуємо розрахунок процесу теплообміну в охолоджувальній камері з використанням математичної моделі. Для перевірки правильності роботи моделі і для отримання подальших даних для розробки програмного продукту, математична модель розраховувалась в середовищі MathCAD 2015, методом Рунге-Кутта 4 порядку.

#### Результати розрахунку параметрів для охолодження матеріалу

$$1. \text{ Коефіцієнт тепловіддачі } \underline{K} := 3.25 \cdot \frac{(0.972 \cdot 2.7)^{0.8}}{1.3^{0.2}} = 6.673$$

#### Розрахунок математичної моделі

$$1. \text{ Початкові дані для розрахунку } \underline{T} := \begin{pmatrix} 60.3 \\ 55 \end{pmatrix}$$

$$\text{Model}(t, T) := \begin{bmatrix} \frac{v_m \cdot C_m \cdot (T_{sm} - T_0) - F \cdot K \cdot (T_0 - T_1)}{V_m \cdot C_m} \\ \frac{v_a \cdot C_a \cdot (T_{sa} - T_0) - F \cdot K \cdot (T_0 - T_1)}{V_a \cdot C_a} \end{bmatrix}$$

$$\text{Calculate} := \text{rkfixed}(T, 0, 900, 100, \text{Model})$$

Рисунок 3.8 – Фрагмент розрахунку математичної моделі для охолоджувальної камери методом Рунге-Кутта

Рішенням математичної моделі буде значення температур речовин в залежності від часу перебування матеріалу в охолоджувальній камері (рис. 3.9).

Графік показує зміну температури матеріалу (червона крива), і зміну температури сушильного агенту (синя крива). Процес відбувається 15 хвилин

згідно технічного регламенту, і матіал досягає потрібної температури, що в свою чергу добре для подальшого його зберігання.

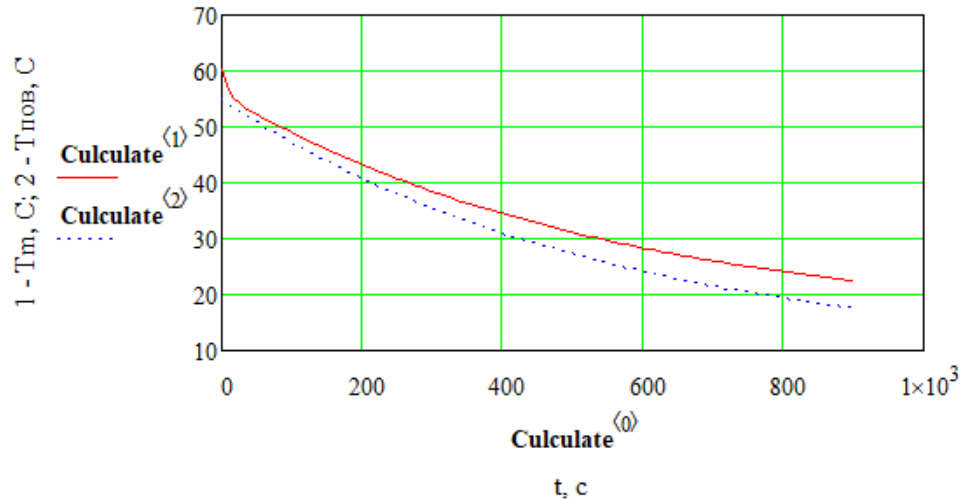


Рисунок 3.9 – Криві зміни температури охолоджувального агента і матеріалу  
 Розрахунок математичної моделі для охолоджувальної камери проведені в програмному середовищі MathCAD. Результати представлені у додатку Г.

### 3.3 Програмний модуль для розрахунку сушильно-охолоджувальної установки

#### 3.3.1 Технічне завдання на розробку програмного модулю

Модуль призначений для моделювання процесу сушіння дисперсних матеріалів. Вихідними даними для розрахунку є:

1. Діаметри сушильних труб, м;
2. Кількість сушильних труб, шт;
3. Діаметри охолоджувальних труб, м;
4. Кількість охолоджувальних труб, шт;
5. Температура сушильного агента на вході в установку, К;
6. Температура охолоджувального агента на вході в установку, К;
7. Теплоємність дисперсного матеріалу, Дж/м<sup>3</sup>·К;
8. Теплоємність повітря, Дж/м<sup>3</sup>·К;
9. Вміст вологи в матеріалі, кг вологи/кг сухого повітря;

10. Вміст вологи в сушильному агенті, кг вологи/кг сухого повітря;
11. Коефіцієнт сушки;
12. Рівноважна вологість, кг вологи/кг сухого повітря;
13. Час перебування матеріалу в апараті 1 800 с (900с - сушильна камера, 900с - охолоджувальна камера);
14. Витрати сушильного агента, м<sup>3</sup>/год;
15. Витрати охолоджувального агента, м<sup>3</sup>/год;

Вимоги до програмного модулю:

1. Програмний модуль має містити опис дипломного проекту (мету, об'єкт дослідження, предмет дослідження, задачі дослідження).
2. Програмний модуль має містити верхнє меню з основними розділами (файл - в якому присутні опції для обрахунку математичних моделей, математичні моделі - записані тестові коефіцієнти для розрахунку математичних моделей, довідка - потрібна для того щоб користувач міг отримати довідку, щодо розрахунку математичних моделей).
3. Програмний модуль складається з декількох форм для зручного представлення розрахунків, так і результатів.
4. Програмний модуль повинен розраховувати математичні моделі і виводити отримані результати на форму.
5. Програмний модуль має містити виводити розрахункові залежності в графічному представленні.

Середовище розробки програмного модуля Visual Studio 2017, мова програмування C#.

### **3.3.2 Розрахунок установки для сушіння дисперсних матеріалів**

Для озробки програмного модулю використано середовище розробки Visual Studio 2017. Код написано мовою програмування C# та з використанням технології .NET Framework 4.61. Алгоритм наведено на рисунку 3.10.

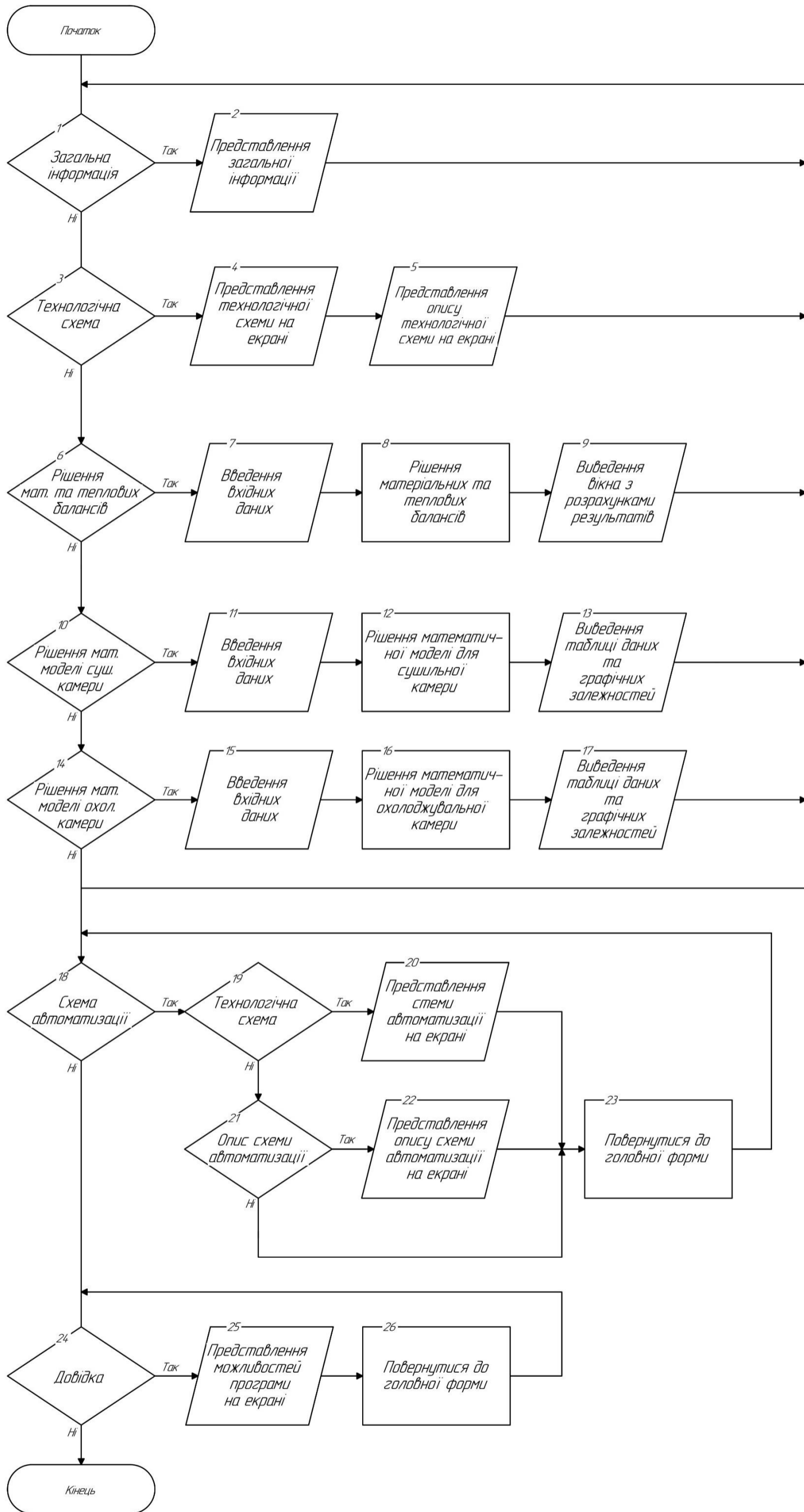


Рисунок 3.10 – Блок схема програмного модуля

За роботу програмного модулю відповідає файл – Diploma Master.

Основні елементи обчислювального модуля наведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Основні елементи обчислювального модуля

Елемент	Назва	Призначення
Форма (Form)	Form3.h	Головне вікно початку роботи з програмним модулем
Форма (Form)	Form2.h	Загальне представлення схеми автоматизації
Форма (Form)	Form4.h	Довідкова інформація про програму
Рисунок PictureBox	picturebox1 – picturebox8	Графічні матеріали (технологічна схема, схема автоматизації, загальні зображення)
Вкладки tabControl1	tabPage1, tabPage2, tabPage3, tabPage4, tabPage5,	Представлення загальної інформації, технологічної схеми, розрахунку матеріальних та теплових балансів, розрахунку сушильної та охолоджувальної камер.
Вкладки tabControl2	tabPage1, tabPage2,	Представлення схеми автоматизації та її опису
Таблиця dataGridView	dataGridView1, dataGridView2	Виведення розрахункових значень у вигляді таблиці
Заголовки Label	label	Представлення заголовків основних даних які використовує програмний модуль
Текстові поля TextBox	textBox	Використовується для введення вхідних даних та виведення розрахункового значення коефіцієнту охолодження
Текстові поля RichTextBox	richTextBox1, richTextBox2, richTextBox3, richTextBox4,	Виведення розрахункових значень матеріальних та теплових балансів та описів технологічної схеми та схеми автоматизації
Графіки Chart	chart1, chart2, chart3, chart4	Представлення графічних залежностей при розрахунку сушильної та охолоджувальної камер

Розроблений програмний продукт включає в себе такі обробники подій (табл. 3.5):

Таблиця 3.5 – Обробники подій обчислювального модуля

Назва процедури	Призначення
exit_workToolStripMenuItem_Click	Зчитує натиск на кнопку користувачем для обробки завершення роботи програми
menu_automatization_Click	Зчитує натиск на кнопку користувачем для обробки переходу на вікно на якому зображена та описується схема автоматизації
Dovidka_Click	Зчитує натиск на кнопку користувачем для обробки переходу на вікно на якому описується можливості програмного модулю та інформацію про розробника
mat_balansToolStripMenuItem_Click	Зчитує натиск на кнопку користувачем для обробки введення тестових даних, які в подальшому використовуються для розрахунку теплових і матеріальних балансів
hot_boxToolStripMenuItem_Click	Зчитує натиск на кнопку користувачем для обробки введення тестових даних, які в подальшому використовуються для розрахунку сушильної камери
menu_cold_box_text_Click	Зчитує натиск на кнопку користувачем для обробки введення тестових даних, які в подальшому використовуються для розрахунку охолоджувальної камери
ToolStripMenuItem_Click	Зчитує натиск на кнопку користувачем для обробки очищення тестових даних і розрахункових результатів
menu_tepbal_Click, button2_Click	Зчитує натиск на кнопку користувачем для обробки розрахунку теплового балансу
menu_matbal_Click, button1_Click_1	Зчитує натиск на кнопку користувачем для обробки розрахунку матеріального балансу

## Продовження до таблиці 3.5

hot_box1ToolStripMenuItem_Click	Зчитує натиск на кнопку користувачем для обробки розрахунку математичної моделі сушильної камери
cold_box_Click	Зчитує натиск на кнопку користувачем для обробки розрахунку математичної моделі охолоджувальної камери

Програмний модуль можна використовувати для перевірки розрахунку будь-якої багатотрубної сушильно-охолоджувальної установки.

Код розробленого програмного модуля приведений в Додатку Г.

### 3.3.3 Інструкція по користуванню програмним продуктом

Програмний продукт складається з програмних вікон і вирішує наступні задачі:

- 1) вікно представлення загальної інформації, технологічної схеми, розрахунку матеріальних та теплових балансів, і розрахунку сушильної та охолоджувальної камер установки;
- 2) вікно представлення схеми автоматизації та її опису;
- 3) вікно довідкової інформації про продукт;



Рисунок 3.11 – Головне вікно програмного модуля

На головному вікні програми (рис. 3.11) описується тема дипломного проекту, його мета об'єкт та предмет дослідження і основні задачі які вирішуються в проекті. Також поширені дисперсні матеріали.

На вкладці «Технологічна схема» (рис 3.12) розміщена технологічна схема з підписом технологічних апаратів. Присутній повний опис технологічного процесу.

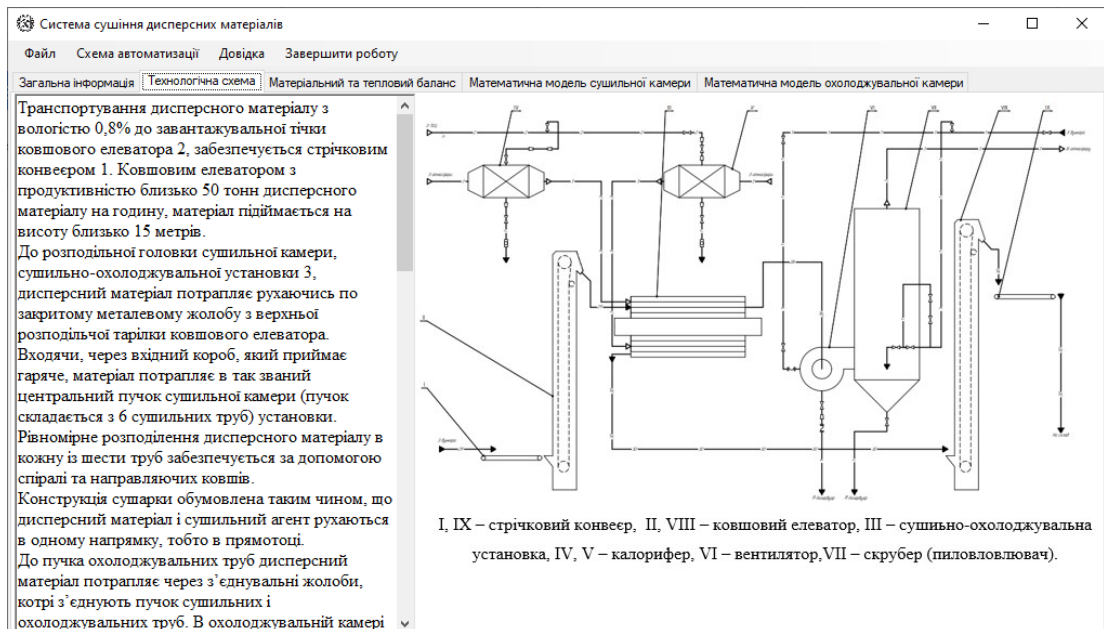


Рисунок 3.11 – Вкладка «Технологічна схема»

Наступна вкладка «Матеріальний та тепловий баланс» користувач може самостійно ввести у запропоновані для вводу поля дані: масову витрату дисперсного матеріалу, початкову і кінцеву вологість матеріалу, відносну вологість агенту до калорифера і після сушіння, густину сушильного агенту, теплоємності вологи та матерілу, початкову та кінцеву температуру дисперсного матеріалу, температуру сушильного агенту, а також може скористатися заготовленими тестовими даними, які можна отримати «Файл» – «Значення за зомовчуванням» – «Матеріальний та тепловий баланс».

Після введення даних можна скористатися кнопками «Розрахувти матеріальний баланс сушарки» та «Розрахувти тепловий баланс сушарки» для розрахунку матеріального та теплового балансу. Передбачена можливість розрахунку через верхнє меню «Файл» – «Розрахунок» – «Матеріальний баланс».

Після цього в передбачених для цього вікнах з'явиться розрахунок матеріального та теплового балансу (рис 3.13).

Система сушіння дисперсних матеріалів

Файл Схема автоматизації Довідка Завершити роботу

Загальна інформація Технологічна схема **Матеріальний та тепловий баланс** Математична модель сушильної камери Математична модель охолоджувальної камери

Масова витрата висушеного дисперсного матеріалу, Gm 13,889 кг/с  
 Початкова вологість матеріалу, Wsm 0,8 %  
 Кінцева вологість матеріалу, Wfm 0,05 %  
 Відносна вологість агенту після калориферу, Fsa 65 %  
 Відносна вологість агенту після сушіння, Ffa 30 %  
 Густина агенту, ρa 0,917 кг/м3  
 Теплоємність води, Cw 4190 Дж/кг C

Початкова температура дисперсного матеріалу, Tsm 60 C  
 Кінцева температура дисперсного матеріалу, Tfm 25 C  
 Температура агенту перед калорифером, Ta 20 C  
 Температура сушильного агенту після калориферу, Tsa 90 C  
 Температура сушильного агенту після сушіння, Tsa 50 C  
 Температура матеріалу перед охолодженням, Tcm 60,3 C  
 Теплоємність матеріалу, Cm 1550 Дж/кг C

Розрахувати матеріальний баланс сушарки  
 Розрахувати тепловий баланс сушарки

**Матеріальний баланс сушарки**

Матеріальний баланс виражається рівняннями:  
 1. По абсолютно сухій речовині в висушеному матеріалі  
 $G_s = 13,9940075604839$   
 2. Маса води виділяемої з матеріалу  
 $W = 0,105007560483871$   
 3. Витрати сушильного агенту на сушарку за секунду  
 $G_{air} = 7,00050403225809$   
 4. Витрати сушильного агенту на сушарку за годину  
 $G_{air} = 25201,8145161291$   
 5. Об'ємна витрата сушильного агенту при температурі 20 C  
 $V_{air} = 27482,8947831288$   
 6. Витрати охолоджувального агенту на охолодження за секунду  
 $G_{air} = 17,0236701388889$   
 7. Витрати охолоджувального агенту на охолодження за годину  
 $G_{air} = 61285,2125$   
 8. Об'ємна витрата охолоджувального агенту при температурі 20 C  
 $V_{air} = 66832,2928026172$

**Тепловий баланс сушарки**

Тепловий баланс виражається рівняннями:  
 1. З сушильним агентом  
 $G_{air} \cdot I_0 = 329023,68951613$   
 2. З охолоджувальним агентом  
 $G_{air} \cdot I_0 = 800112,496527778$   
 3. З вологим матеріалом в тому числі з абсолютно сухим матеріалом  
 $G_f \cdot C_m \cdot T_{sm} = 1291677$   
 4. З вологою що випарюється з матеріалу  
 $W \cdot C_w \cdot T_{sm} = 26398,9007056453$   
 5. З відрацюваним повітрям  
 $(G_{air} + G_{air}) \cdot I_2 = 2714731,68133961$   
 6. З висухлим матеріалом  
 $G_f \cdot C_m \cdot T_{sm} = 538198,75$   
 7. В основному калорифері  
 $Q_k = 857147,175095804$   
 8. Об'ємна витрата охолоджувального агенту при температурі 20 C  
 $Q_{vtr} = 51428,8305057482$

Рисунок 3.13 – Вкладка «Матеріальний та тепловий баланс»

Одними з головних вкладок програмного модуля є: «Математична модель сушильної камери» та «Математична модель охолоджувальної камери» (рис. 3.14)

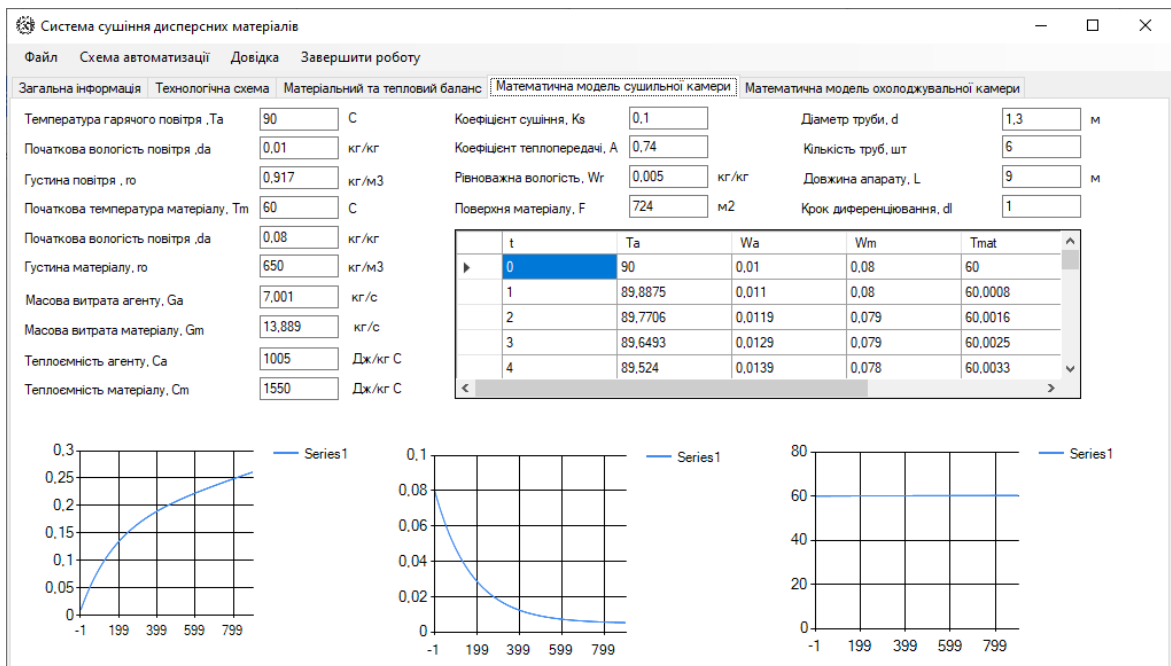


Рисунок 3.14 – Вкладка «Математична модель сушильної камери»

На вкладці розраховується математична модель сушильної камери де користувач вводить дані для розрахунку, також передбачена можливість введення тестових даних «Файл» – «Значення за зомовчуванням» – «Сушильна камера». Після розрахунку методом Рунге-Кутта дані температури сушильного агенту, вологості сушильного агенту, вологості матеріалу, температури матеріалу виводяться в таблицю і будуються графічні залежності вологості, температури від часу (рис. 3.15).

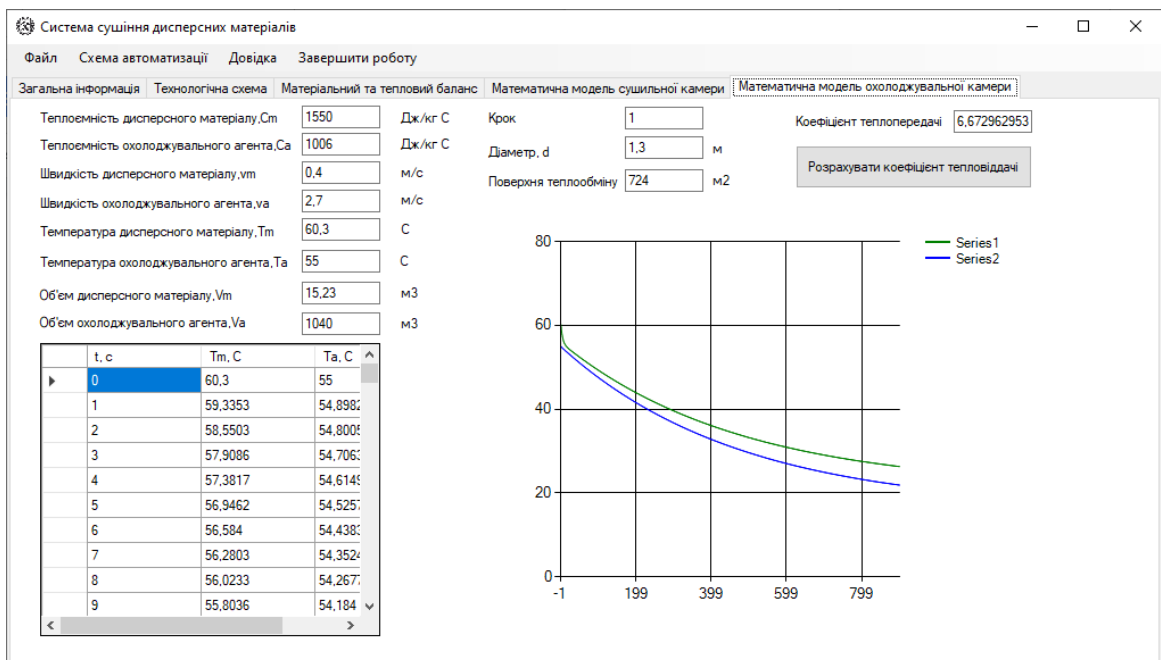


Рисунок 3.15 – Вкладка «Математична модель охолоджувальної камери»

На вкладці розраховується математична модель охолоджувальної камери де користувач вводить дані для розрахунку, також передбачена можливість введення тестових даних «Файл» – «Значення за зомовчуванням» – «Охолоджувальна камера». Після розрахунку методом Рунге-Кутта дані температури охолоджувального агенту та матеріалу виводяться в таблицю і будуються графічні залежності температури від часу.

Пункт меню «Схема автоматизації» відкриває нове вікно програми на якому на вкладці «Схема автоматизації» зображена схема автоматизації, а на вкладці «Опис роботи схеми» описуються основні аспекти роботи автоматизованого процесу сушіння дисперсних матеріалів (рис 3.16).

Пункт меню «Довідка» відкриває нове вікно в якому описано основні можливості програмного модулю, а також інформація про розробника програми (рис 3.17).

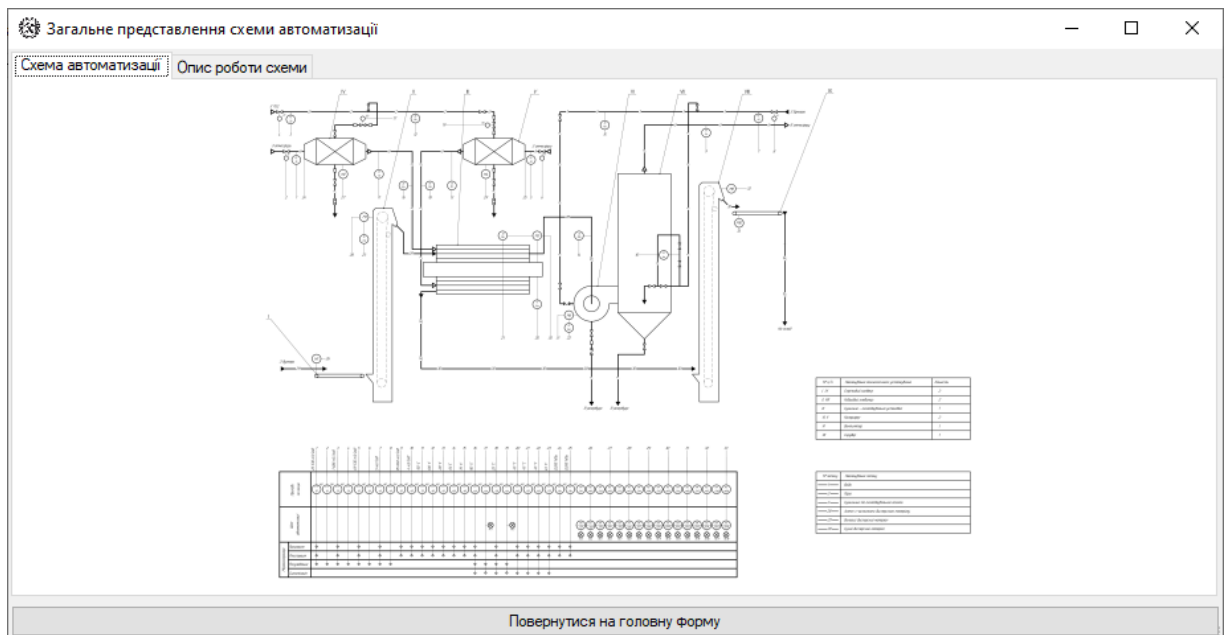


Рисунок 3.16 – Вікно «Загальне представлення схеми автоматизації»

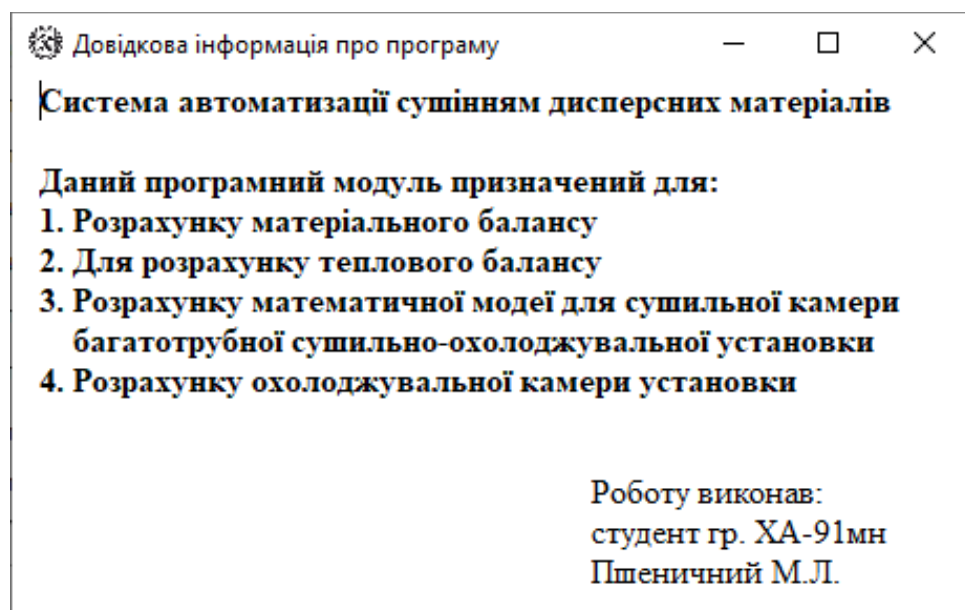


Рисунок 3.17 – Вікно «Довідка»

Пункт меню «Завершити роботу» завершає роботу з програмним модулем.

## **Висновки**

У розділі розглянуто основні режимні параметри об'єкта керування. Розраховано матеріальний та тепловий баланси. Розроблено математичні моделі для сушильної та охолоджувальної камер. Для розробки програмного модулю використано середовище розробки Visual Studio 2017. Код написано мовою програмування C# та з використанням технології .NET Framework 4.61. Реалізовано програмний продукт який здатен розраховувати матеріальні та теплові баланси, математичні моделі для сушильної та охолоджувальної камери відповідно.

## **4 АДАПТИВНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ СУШІННЯМ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ**

### **4.1 Характеристика системи**

Всі системи автоматичного керування за адаптивністю умовно діляться на два види. Перший вид – це системи з жорстким налагодженням. Для побудови і задовільної роботи такої системи достатньо апріорної інформації. Наступний вид системи з гнучким (адаптивним) налагодженням. Для побудови таких систем недостатньо апріорної інформації [26].

Такі (адаптивні) системи змінюють параметри свого налагодження безпосередньо в процесі своєї роботи за рахунок використання робочої інформації, яка отримується під час їх функціонування [27].

Адаптивні системи дозволяють розв'язувати низку важливих задач керування:

- 1) здійснити оптимізацію роботи об'єкта;
- 2) забезпечити працездатність системи з необхідними показниками якості за умов, коли властивості об'єкта змінюються;
- 3) підвищити надійність складних систем, уніфікувати алгоритми керування для класів об'єктів;
- 4) зменшити вимоги до процесу проектування систем за рахунок подальшого поповнення інформації в процесі функціонування.

Для вирішення поставлених задач використовуються два підходи: один з них це зміна структури регулятора і змінення параметрів регулятора. Система працює так:

- 1) аналізують похибку керування (її значення, швидкість зміни, суму);
- 2) на основі цієї інформації в блоці адаптації розраховують параметри регулятора;
- 3) сигнал керування обчислюють на основі ПІ-закону.

Розробка адаптивної системи сушильно-охолоджувальної установки здійснюється за наступним алгоритмом (рис 4.1).

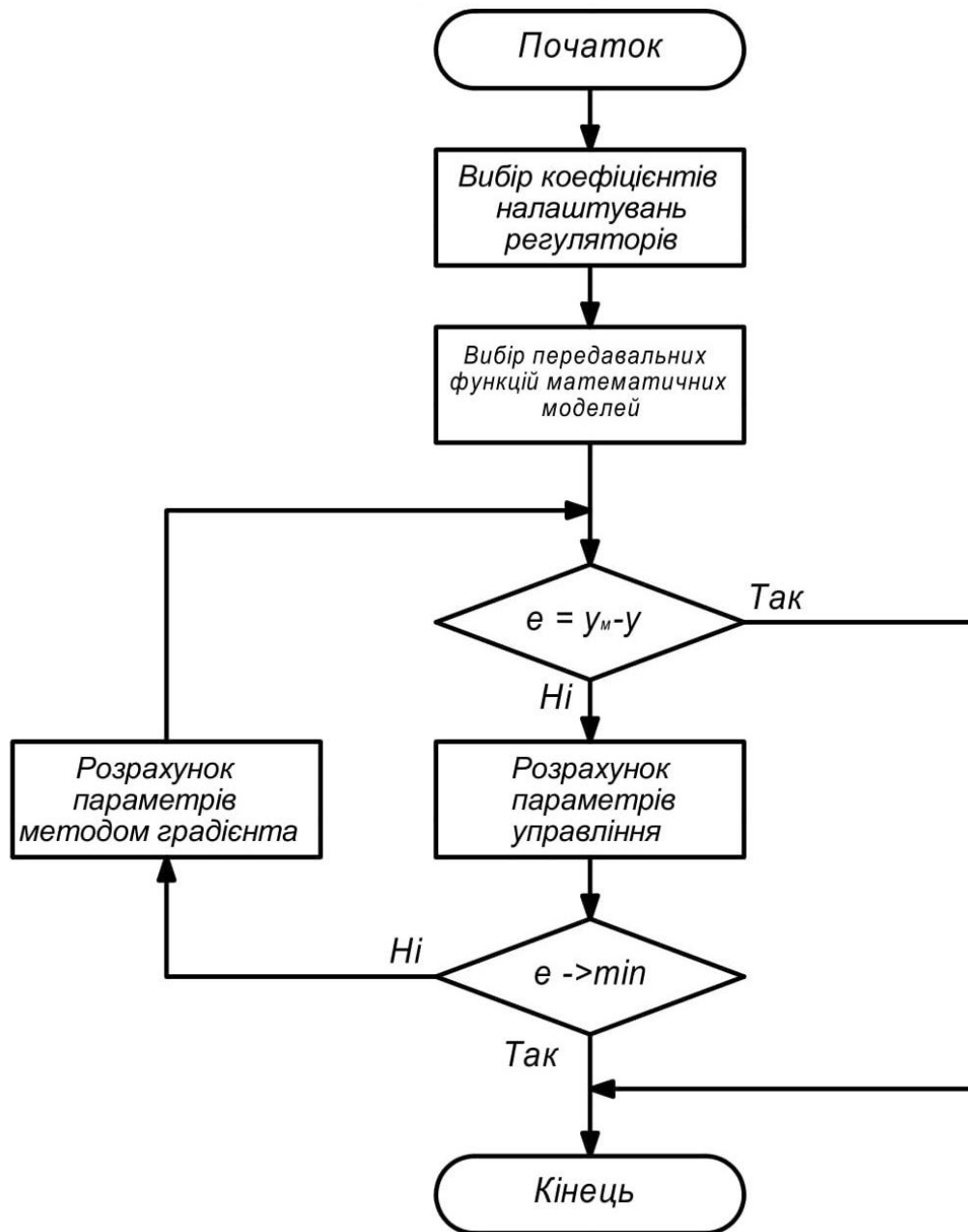


Рисунок 4.1 – Блок схема розробки адаптивної системи управління

## 4.2 Вибір оптимального регулятора

Запишемо систему (рис 4.2), що складається з об'єкту керування яка складається з двох контурів регулювання температурою та ПІ-регуляторів для кожного з контурів. Перший регулятор регулює температуру, що безпосередньо впливає на зміну вологості матеріалу. Другий контур регулює температуру охолоджувального агенту, що в свою впливає на температурау дисперсного матеріалу.

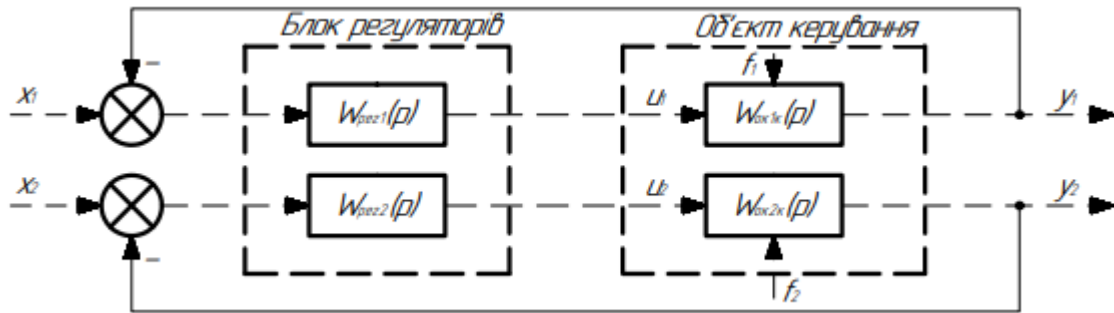


Рисунок 4.2 – Система без контуру адаптації

Для даної системи було обрано ПІ регулятор. Однак не слід забувати, що при синтезі таких регуляторів намагаються оптимізувати критерії, які впливають на якість процу в цілому.

ПІ регулятор має наступні переваги над іншими:

- 1) Регулятор більш простіший в налаштуванні;
- 2) В порівнянні з іншими регуляторами набагато дешевший (так як для досягнення мети потрібно використовувати два регулятора);

Інженерні розрахунки передбачують декілька методів визначення оптимальних показників регулятора.

Амплітудно-фазовою характеристика (АФХ) об'єкта управління може виступати використана для розрахунку регуляторів, де головним критерієм в системі виступає заданий запис міцності [25].

Запас стійкості системи оцінюється або за величиною  $m$  (ступінь коливання системи), або величиною  $M$  (індекс коливання), які характеризують загасання коливальної складової перехідного процесу і пов'язані з ступенем загасання  $\Psi$  [27].

Запас стійкості за фазою – це кут  $\gamma$ , який лежить між дійсною і від'ємною піввіссю і променем, проведеним з початку координат в точку перетину АФХ розімкненої системи з колом одиничного радіуса з центром в початку координат. Чисельно він показує, на скільки повинно збільшитися зміщення за фазою в розімкненій системі при незмінному модулі АФХ (амплітуді) для виходу системи на границю стійкості [27].

Запас стійкості зручно характеризувати показником коливання  $M$ . Показник коливання  $M$  - це відношення максимального значення амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) замкнутої системи (модуля АЧХ) до її значенням на нульовій частоті -  $\omega = 0$  (початкова координата) [27].

Індекс коливань  $M$  є показником запасу стійкості системи. Зручність індексу коливання визначається тим, що запас стійкості системи характеризується одним числом, що мають відносно вузький діапазон для щодо широкого класу систем управління ( $M = 1,1..1,6$ ) [27].

Контур об'єкта керування описується наступними ланками:

$$W_{ок1к}(p) = \frac{k_1}{(1+T_1 \cdot p)(1+T_2 \cdot p)} \quad (4.1)$$

$$W_{ок2к}(p) = \frac{k_2}{(1+T_3 \cdot p)(1+T_4 \cdot p)} \quad (4.2)$$

Передавальна функція регулятора має вигляд:

$$W_{рег}(p) = k_{рег} \cdot \left(1 + \frac{1}{T_u \cdot p}\right), \quad (4.3)$$

де  $k_p$  – коефіцієнт підсилення,  $T_u$  – постійна часу інтегральної складової регулятора.

Для визначення оптимальних параметрів регулятора використаємо середовище програмної розробки MathCAD 2015.

Запишемо передавальну функцію першого контуру об'єкта керування:

$$W_{ок1к}(p) = \frac{k_1}{(1 + T_1 \cdot p)(1 + T_1 \cdot p)}$$

Перейдемо до числових параметрів функції контуру температури для сушильної камери об'єкта керування. Згідно технологічного регламенту процесу сушіння матеріалів, задаємось значеннями параметрів системи:

$$k_1 = 7; T_1 = 0,01; T_2 = 26$$

Задаємось початковим значенням коефіцієнта підсилення  $k_{регп} = 1$ , і початковим значенням часу іподрому  $T_{уп} = 0,5$ .

Записуємо передавальну функцію одного з контурів об'єкта керування і регулятора для розімкненої системи:

$$W_{роз}(p) = W_{рег}(p) \cdot W_{ок}(p) = k_{рег} \cdot \left(1 + \frac{1}{T_u \cdot p}\right) \cdot \frac{k_1}{(1+T_1 \cdot p)(1+T_2 \cdot p)} \quad (4.4)$$

Побудуємо загальну АФХ об'єкта і регулятора для розімкненої системи (рис. 4.3).

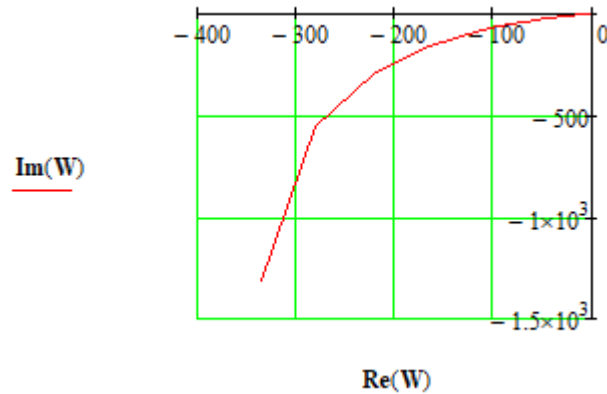


Рисунок 4.3 – АФХ розімкненої системи з ПД –регулятором

Задаємось значенням  $M$ -кола,  $M = 1,4$ , та будуємо промінь  $\beta = 38^\circ$  до від'ємної дійсної піввісі.  $M$ -коло будується таким чином, щоб відбувався дотик до променя і до АФХ системи (рис 4.4).

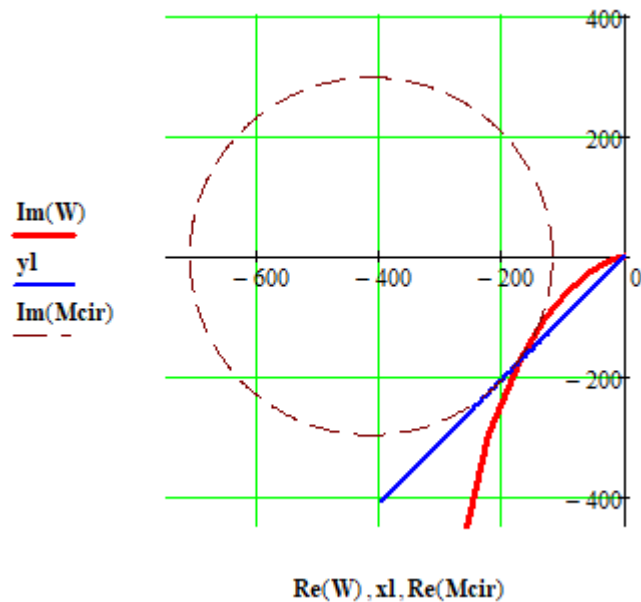


Рисунок 4.4 – АФХ системи з побудовиним променем і  $M$ -колом

Визначаємо радіус  $r$  і коефіцієнт підсилення регулятора  $k_{\text{per}}$ :

$$r = \frac{L}{M} = 296,42 \quad (4.5)$$

$$k_{\text{per}} = \frac{1}{r} = 0,0049 \quad (4.6)$$

Визначено I пару налаштувань ПД регулятора:

$$k_{\text{per}1} = 0,0049; T_{u1} = 0,5;$$

Наступним кроком знаходимо II пару налаштувань попередньо змінюючи  $T_{u2} = 0,7$ . М-коло будується таким чином, щоб відбувався дотик до променя і до АФХ системи (рис 4.5).

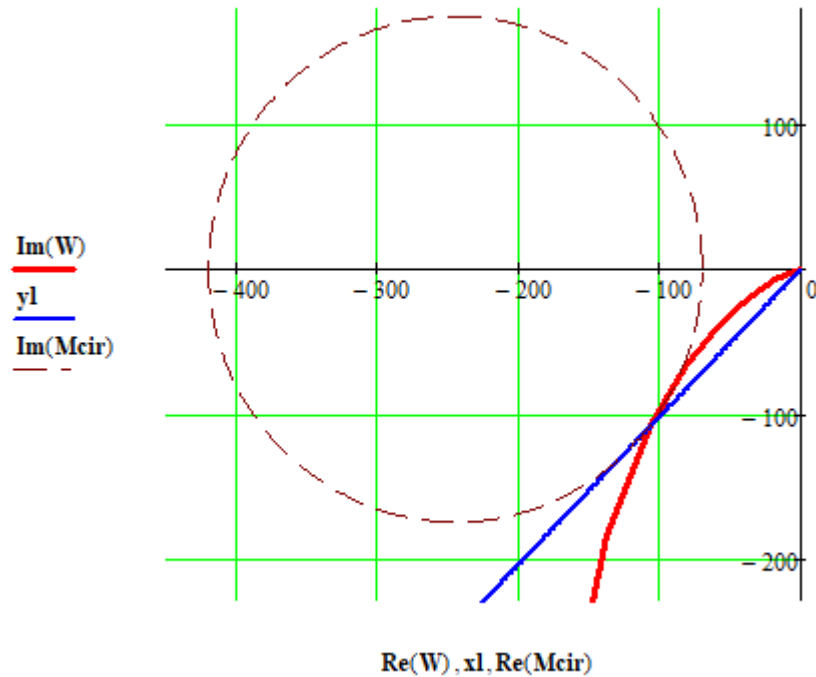


Рисунок 4.5 – АФХ системи з побудовиним променем і М-колом  $T_{u2} = 0,7$

Визначаємо радіус  $r$  і коефіцієнт підсилення регулятора  $k_{\text{пер}}$ :

$$r = \frac{L}{M} = 175$$

$$k_{\text{пер}} = \frac{1}{r} = 0,0083$$

Налаштування регулятора II пари:

$$k_{\text{пер}2} = 0,0083; T_{u2} = 0,7$$

Аналогічно визначаємо III пару налаштувань попередньо змінюючи  $T_{u3} = 0,9$ . М-коло будується таким чином, щоб відбувався дотик до променя і до АФХ системи (рис 4.6).

Визначаємо радіус  $r$  і коефіцієнт підсилення регулятора  $k_{\text{пер}}$ :

$$r = \frac{L}{M} = 156,49$$

$$k_{\text{пер}} = \frac{1}{r} = 0,0093$$

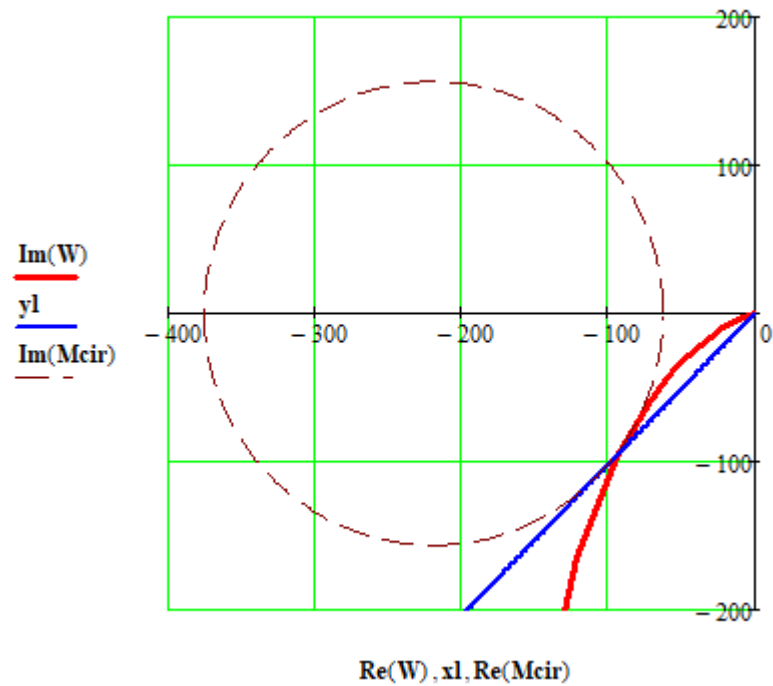


Рисунок 4.6 – АФХ системи з побудовиним променем і М–колом  $T_{u3} = 0,9$   
Налаштування регулятора III пари:

$$k_{\text{перз}} = 0,0093; T_{u3} = 0,9$$

Знаходимо IV пару налаштувань регулятора змінивши  $T_{u4} = 1$ . М–коло будується таким чином, щоб відбувався дотик до променя і до АФХ системи (рис 4.7).

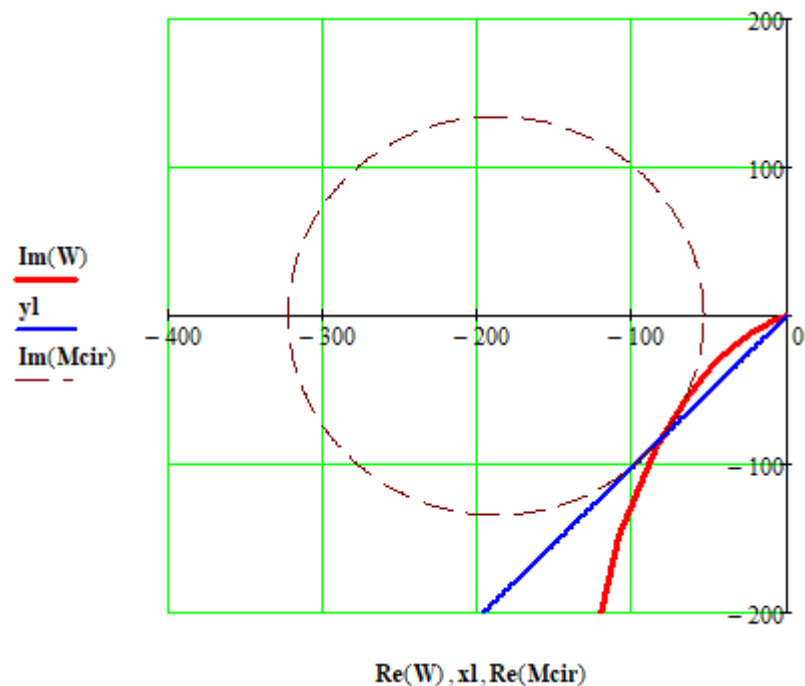


Рисунок 4.7 – АФХ системи з побудовиним променем і М–колом при  $T_{u4} = 1$

Визначаємо радіус  $r$  і коефіцієнт підсилення регулятора  $k_{\text{рег}}$ :

$$r = \frac{L}{M} = 134,28$$

$$k_{\text{рег}} = \frac{1}{r} = 0,011$$

Налаштування регулятора IV пари:

$$k_{\text{рег4}} = 0,011; T_{u4} = 1$$

Після проведення всіх розрахунків налаштувань регулятора, потрібно визначити границю області запасу стійкості (рис 4.8). Ця область показує що АЧХ системи не буде перевищувати задану величину. Обираємо оптимальні налаштування регулятора. Оптимальними вважаються налаштування в яких точка запасу стійкості буде відповідати максимальному значенню співвідношення  $\frac{k_{\text{рег}}}{T_u}$ .

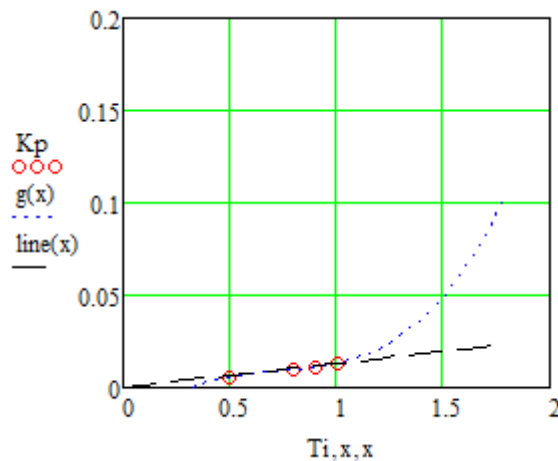


Рисунок 4.8 – Границя області запасу стійкості

Отже оптимальними налаштуваннями III – регулятора для першого контуру контура є:

$$k_{\text{рег4}} = 0,011; T_{u4} = 1$$

Для другого контуру об'єкта керування запишемо передавальну функцію:

$$W_{\text{ок2к}}(p) = \frac{k_2}{(1 + T_3 \cdot p)(1 + T_4 \cdot p)}$$

Перейдемо до числових параметрів функції контуру температури для сушильної камери об'єкта керування. Згідно технологічного регламенту процесу сушіння матеріалів, задаємось значеннями параметрів системи:

$$k_2 = 15; T_3 = 0,04; T_4 = 12$$

Передавальна функція регулятора має вигляд:

$$W_{\text{пер}}(p) = k_{\text{пер}} \cdot \left(1 + \frac{1}{T_u \cdot p}\right)$$

Записуємо передавальну функцію одного з контурів об'єкта керування і регулятора для розімкненої системи:

$$W_{\text{роз}}(p) = W_{\text{пер}2}(p) \cdot W_{\text{ок}2\kappa}(p) = k_{\text{пер}} \cdot \left(1 + \frac{1}{T_u \cdot p}\right) \cdot \frac{k_2}{(1+T_3 \cdot p)(1+T_4 \cdot p)} \quad (4.7)$$

I пара налаштувань регулятора:

$$k_{\text{пер}1} = 0,0052; T_{u1} = 0,5$$

II пара налаштувань регулятора:

$$k_{\text{пер}2} = 0,0095; T_{u2} = 0,7$$

III пара налаштувань регулятора:

$$k_{\text{пер}3} = 0,011; T_{u3} = 0,9$$

IV пара налаштувань регулятора:

$$k_{\text{пер}4} = 0,013; T_{u4} = 1$$

Отже оптимальними налаштуваннями III – регулятора для другого контура є:

$$k_{\text{пер}4} = 0,013; T_{u4} = 1$$

Після того як визначені оптимальні налаштування регулятора побудуємо перехідну характеристику для замкнутої системи за каналом «завдання – вихід» при оптимальних значеннях регулятора.

Розрахунки проводились за допомогою програми MathCAD 2015 і представлені у додатку Е.

Записуємо передавальну функцію замкнутої системи регулювання:

$$W_{\text{зам}}(p) = \frac{W_{\text{роз}}(p)}{1+W_{\text{роз}}(p)} \quad (4.8)$$

Зморотнім перетворенням по Лапласу, отримаємо перехідну характеристику попередньо помноживши на  $1/p$ .

$$\phi(t) := W_z \cdot \frac{1}{p} \left| \begin{array}{l} \text{invlaplace, p, t} \\ \text{float, 2} \end{array} \rightarrow 0.0017 \cdot e^{-0.19 \cdot t} + -0.97 \cdot \cos(0.19 \cdot t) \cdot e^{-0.12 \cdot t} + -0.38 \cdot \sin(0.19 \cdot t) \cdot e^{-0.12 \cdot t} \right| + 0.99_*$$

В результаті отримано перехідну характеристику системи з ПІ регулятором (рис. 4.9).

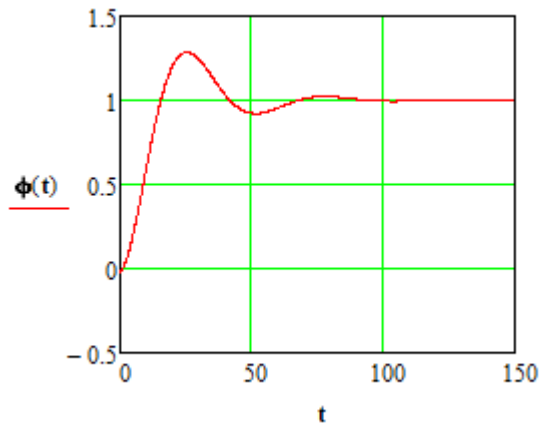


Рисунок 4.9 – Перехідна характеристика замкненої системи з ПІ-регулятором

Розрахунки проводились за допомогою програми MathCAD 2015 і представлені у додатку Ж.

#### 4.3 Синтез контуру адаптації і аналіз методами теорії чутливості

Контур адаптації синтезується на базі структури адаптивної системи з еталонною моделлю. Це виступає суттєвою перевагою перед іншими за рахунок високої швидкості адаптації та незначного об'єму необхідної апріорної інформації.

В запропонованій системі поведінка основного контуру порівнюється з поведінкою еталонної моделі і задача пристрою адаптації полягає в мінімізації функції неузгодженості їх станів шляхом зміни налаштувань регулятора основного контура.

Під впливом сторонніх факторів на об'єкт параметри регулятора будуть змінюватись. В результаті чого оптимальне налагодження порушиться. Для відновлення такого узгодження потрібно переналаштувати регулятор, а саме змінити його параметри  $n_0$ ,  $n_1$  (для сушильної камери),  $m_0$ ,  $m_1$  (для охолоджувальної камери). Основною ознакою цього є те, що структура

регулятора повинна передбачити зміну цих параметрів при функціонуванні системи.

$$N_0 = N_0^0 + n_0; N_1 = N_1^0 + n_1, \quad (4.9)$$

$$M_0 = M_0^0 + m_0; M_1 = M_1^0 + m_1, \quad (4.10)$$

де  $N_1^0$  – незмінна частина,  $n_1$  – змінна частина,  $M_1^0$  – незмінна частина,  $m_1$  – змінна частина відповідно для сушильної і охолоджувальної камери.

Для підстройки параметрів регулятора потрібно ввести в систему так званий блок адаптації (БА) з використанням еталонної моделі [28].

Після чого структура системи набуває наступного вигляду (рис 4.10).

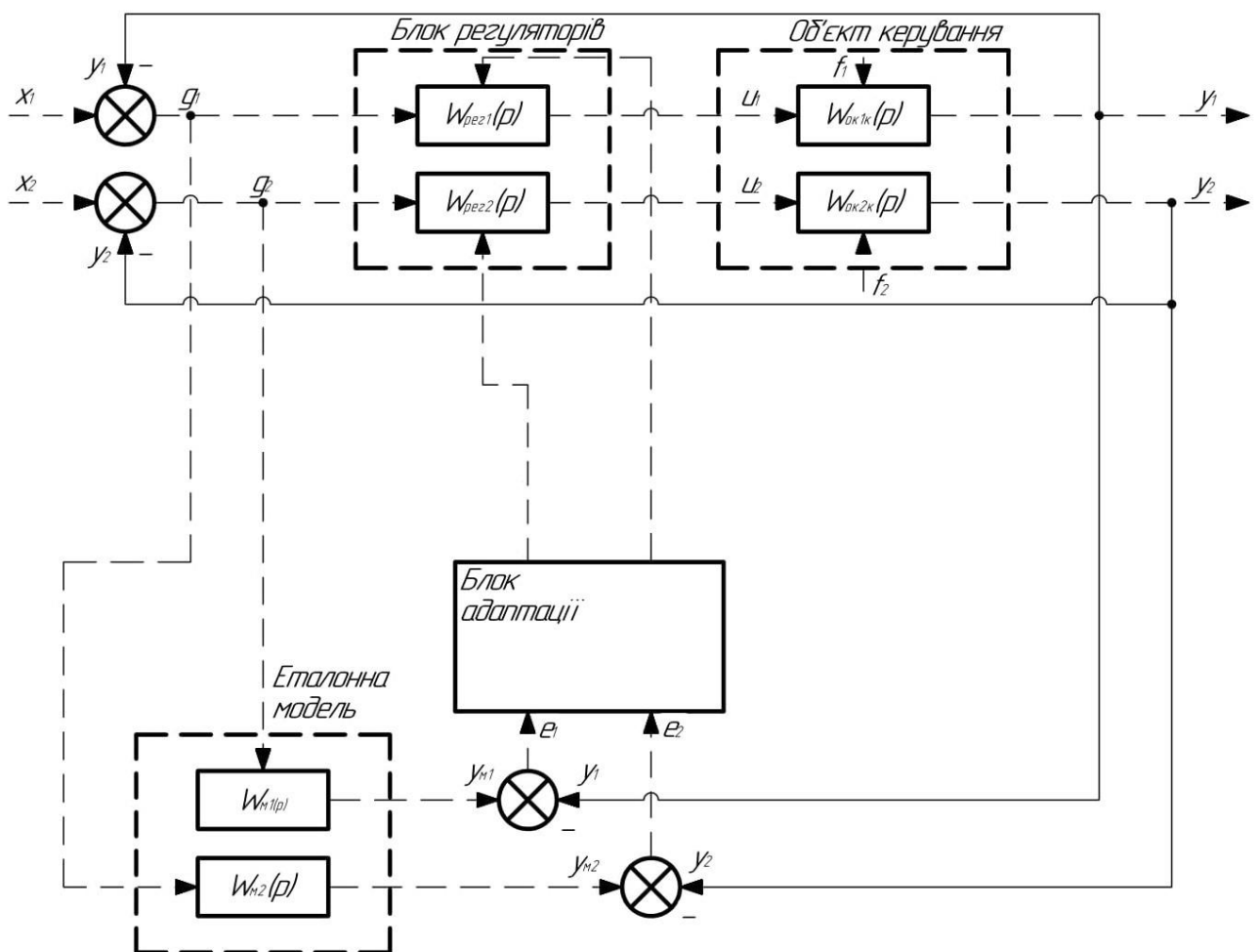


Рисунок 4.10 – Система з влаштованим блоком адаптації

Визначимо передавальну функцію для розімкненої системи з наступними параметрами (контур для сушильної та охолоджувальної камер):

$$W_{\text{роз1к}}(p) = W_{\text{пер1}}(p) \cdot W_{\text{ок1к}}(p) = \frac{k \cdot [(N_1^0 + n_1)p + N_0^0 + n_0]}{p \cdot (a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0)} \quad (4.11)$$

$$W_{\text{роз2к}}(p) = W_{\text{рег2}}(p) \cdot W_{\text{ок2к}}(p) = \frac{k \cdot [(M_1^0 + m_1)p + M_0^0 + m_0]}{p \cdot (c_2 \cdot p^2 + c_1 \cdot p + c_0)} \quad (4.12)$$

В якості еталонної моделі для сушильної камери використовується ланка з передавальною функцією:

$$W_{M1}(p) = \frac{k_M \cdot (b_1 \cdot p + b_0)}{p \cdot (a_{2M} \cdot p^2 + a_{1M} \cdot p + a_{0M})} \quad (4.13)$$

Для охолоджувальної камери:

$$W_{M2}(p) = \frac{k_M \cdot (d_1 \cdot p + d_0)}{p \cdot (c_{2M} \cdot p^2 + c_{1M} \cdot p + c_{0M})} \quad (4.14)$$

Коли параметри об'єкта ще не змінились буде діяти наступна умова:

$$W_{\text{роз}}(p) = W_M(p) \quad (4.15)$$

Після деякого часу умова порушиться і з'явиться помилка адаптації:

$$\varepsilon = y_M - y \quad (4.16)$$

яку можна використати для формування критерія адаптації [28]:

$$J(n_0, n_1) = \varepsilon^2 \quad (4.17)$$

$$S(m_0, m_1) = \varepsilon^2 \quad (4.18)$$

В якості алгоритму для зміни параметрів  $n_0, n_1, m_0, m_1$ , використаємо градієнтний метод. Суть методу полягає в тому, що параметри настраюються в кожний момент часу і змінюються так, щоб зменшити значення  $J(n_0, n_1)$  з максимальною швидкістю [28].

Визначасмо компоненти градієнта для сушильної камери:

$$\text{grad}J(n_0, n_1) = i \frac{\partial J}{\partial n_0} + j \frac{\partial J}{\partial n_1} \quad (4.19)$$

$$\frac{\partial J}{\partial n_0} = \frac{\partial J}{\partial \varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial n_0}; \quad \frac{\partial J}{\partial n_1} = \frac{\partial J}{\partial \varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial n_1} \quad (4.20)$$

Компоненти градієнта для сушильної камери:

$$\text{grad}S(m_0, m_1) = i \frac{\partial S}{\partial m_0} + j \frac{\partial S}{\partial m_1} \quad (4.21)$$

$$\frac{\partial S}{\partial m_0} = \frac{\partial S}{\partial \varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial m_0}; \quad \frac{\partial S}{\partial m_1} = \frac{\partial S}{\partial \varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial m_1} \quad (4.22)$$

Швидкість зміни параметрів  $n_0, n_1$  визначається за формулами (для сушильної камери) :

$$\frac{dN_0}{dt} = -\lambda_0 \frac{\partial J}{\partial n_0}; \quad \frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 \frac{\partial J}{\partial n_1} \quad (4.23)$$

Швидкість зміни параметрів  $m_0, m_1$  визначається за формулами (для охолоджувальної камери):

$$\frac{dm_0}{dt} = -\lambda_2 \frac{\partial S}{\partial m_0}; \quad \frac{dm_1}{dt} = -\lambda_3 \frac{\partial S}{\partial m_1} \quad (4.24)$$

Знак “–” визначає антиградієнтний напрямок зміни параметрів, тобто в сторону зменшення  $J(\varepsilon)$ .  $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  – вагові коефіцієнти, що визначають значимість кожного з параметрів настроювання [28]. Враховуючи формулу (4.17) для рівнянь (4.19, 4.20), одержимо:

$$\frac{\partial J}{\partial n_0} = 2\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial n_0}; \quad \frac{\partial J}{\partial n_1} = 2\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial n_1} \quad (4.25)$$

Для охолоджувальної камери врахувавши формулу (4.18) для рівнянь (4.21, 4.22), одержуємо:

$$\frac{\partial S}{\partial m_0} = 2\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial m_0}; \quad \frac{\partial S}{\partial m_1} = 2\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial m_1} \quad (4.26)$$

В сигналі похибки  $\varepsilon = y_M - y$  величина  $y_M$  не залежить від параметрів  $n_0, n_1, m_0, m_1$  тому:

$$\frac{dn_0}{dt} = 2\lambda_0 \varepsilon \frac{dy}{dn_0}; \quad \frac{dn_1}{dt} = 2\lambda_1 \varepsilon \frac{d\varepsilon}{dn_1} \quad (4.27)$$

$$\frac{dm_0}{dt} = 2\lambda_2 \varepsilon \frac{dy}{dm_0}; \quad \frac{dm_1}{dt} = 2\lambda_3 \varepsilon \frac{d\varepsilon}{dm_1} \quad (4.28)$$

### Функції

$$U_0 = \frac{dy}{dn_0}; \quad U_1 = \frac{dy}{dn_1} \quad (4.29)$$

$$U_2 = \frac{dy}{dm_0}; \quad U_3 = \frac{dy}{dm_1} \quad (4.30)$$

називаються функціями чутливості системи за відповідними параметрам настроювання.

Функції чутливості знайшли широке використання при реалізації чисельних градієнтних методів оптимізації динамічних систем. Складові градієнта є не що інше, як функції (коефіцієнти) чутливості. Для їх оцінювання використовуються різноманітні алгоритми чисельного диференціювання, які вимагають значного об’єму обчислень, характеризуються малою оперативністю та точністю. Окрім того, аналіз функцій чутливості на кожному кроці оптимізації дозволяє знаходити напрямок максимальної чутливості функціоналу, відсіювати

частину, несуттєвих параметрів на даному кроці, що в цілому може підвищити ефективність всієї процедури оптимізації. В розглянутій постановці знаходяться та аналізуються функції чутливості по відношенню до параметрів управління регулятора. Функції чутливості також використовуються при синтезі оптимальних систем з врахуванням вимог малої чутливості [16].

Методи теорії чутливості застосовують при дослідженні адаптивних систем. Дослідження чутливості показників якості та оптимальності може бути використане для оцінки того, наскільки ефективно адаптивна система рефуге на ті чи інші параметричні діяння [16].

Ефективним є використання функцій чутливості є використання функцій чутливості у безпошукових градієнтних системах із самонастройкою. При проектуванні певних класів адаптивних систем надзвичайно важливою є задача вибору параметрів регулятора, що переналагоджується за сигналом контуру адаптації [28].

Враховуючи те, що

$$Y(p) = g_1(p)W_{\text{роз1}}(p) = g_1(p) \frac{k_1 \cdot [(N_1^0 + n_1)p + N_0^0 + n_0]}{p \cdot (a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0)} \quad (4.31)$$

$$Y(p) = g_2(p)W_{\text{роз2}}(p) = g_2(p) \frac{k_2 \cdot [(M_1^0 + m_1)p + M_0^0 + m_0]}{p \cdot (c_2 \cdot p^2 + c_1 \cdot p + c_0)} \quad (4.32)$$

в силу комутативності операції перетворення Лапласа і диференціювання по параметру, тобто:

$$U_1(p) = \frac{\partial}{\partial n_1} [g_1(p)W_{\text{роз1}}(p)] = g_1(p) \frac{\partial}{\partial n_1} W_{\text{роз1}}(p) \quad (4.33)$$

$$U_3(p) = \frac{\partial}{\partial m_1} [g_2(p)W_{\text{роз2}}(p)] = g_2(p) \frac{\partial}{\partial m_1} W_{\text{роз2}}(p) \quad (4.34)$$

одержимо:

$$U_0(p) = g_1(p) \frac{\partial}{\partial n_0} \left\{ \frac{k_1 \cdot [(N_1^0 + n_1)p + N_0^0 + n_0]}{p \cdot (a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0)} \right\} = g_1(p) \frac{k_1}{p \cdot (a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0)} \quad (4.35)$$

$$U_1(p) = g_1(p) \frac{\partial}{\partial n_1} \left\{ \frac{k_1 \cdot [(N_1^0 + n_1)p + N_0^0 + n_0]}{p \cdot (a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0)} \right\} = g_1(p) \frac{k_1}{p \cdot (a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0)} \quad (4.36)$$

$$U_2(p) = g_2(p) \frac{\partial}{\partial n_0} \left\{ \frac{k_2 \cdot [(M_1^0 + m_1)p + M_0^0 + m_0]}{p \cdot (c_2 \cdot p^2 + c_1 \cdot p + c_0)} \right\} = g_2(p) \frac{k_2}{p \cdot (c_2 \cdot p^2 + c_1 \cdot p + c_0)} \quad (4.37)$$

$$U_3(p) = g_2(p) \frac{\partial}{\partial n_1} \left\{ \frac{k_2 \cdot [(M_1^0 + m_1)p + M_0^0 + m_0]}{p \cdot (c_2 \cdot p^2 + c_1 \cdot p + c_0)} \right\} = g_2(p) \frac{k_2}{p \cdot (c_2 \cdot p^2 + c_1 \cdot p + c_0)} \quad (4.38)$$

Тоді:

$$U_0(t) = L^{-1} \left[ g_1(p) \frac{k_1}{p \cdot (a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0)} \right] \quad (4.39)$$

$$U_1(t) = L^{-1} \left[ g_1(p) \frac{k_1}{p \cdot (a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0)} \right] \quad (4.40)$$

$$U_2(t) = L^{-1} \left[ g_2(p) \frac{k_2}{p \cdot (c_2 \cdot p^2 + c_1 \cdot p + c_0)} \right] \quad (4.41)$$

$$U_3(t) = L^{-1} \left[ g_2(p) \frac{k_2}{p \cdot (c_2 \cdot p^2 + c_1 \cdot p + c_0)} \right] \quad (4.42)$$

Із умов (4.27) і (4.29) витікає, що (для сушильної камери):

$$\frac{dn_0}{dt} = 2\lambda_0 \varepsilon U_0(t); \quad \frac{dn_1}{dt} = 2\lambda_1 \varepsilon U_1(t) \quad (4.43)$$

тобто

$$n_0 = 2\lambda_0 \int_0^T \varepsilon(t) L^{-1} \left[ g_1(p) \frac{k_1}{p \cdot (a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0)} \right] dt \quad (4.44)$$

$$n_1 = 2\lambda_1 \int_0^T \varepsilon(t) L^{-1} \left[ g_1(p) \frac{k_1}{p \cdot (a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0)} \right] dt \quad (4.45)$$

Із умов (4.28) і (4.30) витікає, що (для охолоджувальної камери):

$$\frac{dm_0}{dt} = 2\lambda_2 \varepsilon U_2(t); \quad \frac{dm_1}{dt} = 2\lambda_3 \varepsilon U_3(t) \quad (4.46)$$

тобто

$$m_0 = 2\lambda_2 \int_0^T \varepsilon(t) L^{-1} \left[ g_2(p) \frac{k_2}{p \cdot (c_2 \cdot p^2 + c_1 \cdot p + c_0)} \right] dt \quad (4.47)$$

$$m_1 = 2\lambda_3 \int_0^T \varepsilon(t) L^{-1} \left[ g_2(p) \frac{k_2}{p \cdot (c_2 \cdot p^2 + c_1 \cdot p + c_0)} \right] dt \quad (4.48)$$

Виходячи з принципу настроювання передавальна функція системи повинна бути близькою до передавальної функції моделі. Якщо це припущення виконується то у (4.44) і (4.45) для сушильної камери, (4.47) і (4.48) для охолоджувальної камери можна змінити передавальною функцією моделі [28]:

$$n_0 = 2\lambda_0 \int_0^T \varepsilon(t) L^{-1} \left[ g_1(p) \frac{k_1}{p \cdot (a_{2M} \cdot p^2 + a_{1M} \cdot p + a_{0M})} \right] dt \quad (4.49)$$

$$n_1 = 2\lambda_1 \int_0^T \varepsilon(t) L^{-1} \left[ g_1(p) \frac{k_1}{p \cdot (a_{2M} \cdot p^2 + a_{1M} \cdot p + a_{0M})} \right] dt \quad (4.50)$$

$$m_0 = 2\lambda_2 \int_0^T \varepsilon(t) L^{-1} \left[ g_2(p) \frac{k_2}{p \cdot (c_{2M} \cdot p^2 + c_{1M} \cdot p + c_{0M})} \right] dt \quad (4.51)$$

$$m_1 = 2\lambda_3 \int_0^T \varepsilon(t) L^{-1} \left[ g_2(p) \frac{k_3}{p \cdot (c_{2M} \cdot p^2 + c_{1M} \cdot p + c_{0M})} \right] dt \quad (4.52)$$

Зміна параметрів призводить до того, що ми одержали не ідеальний градієнтний метод настроювання, але дуже близький до нього, так як блок адаптації буде здійснювати зміну параметрів  $n_0, n_1, m_0, m_1$  до тих пір поки буде існувати похибка  $\varepsilon$ . Використовуючи все вище сказане отримаємо систему (рис 4.10).

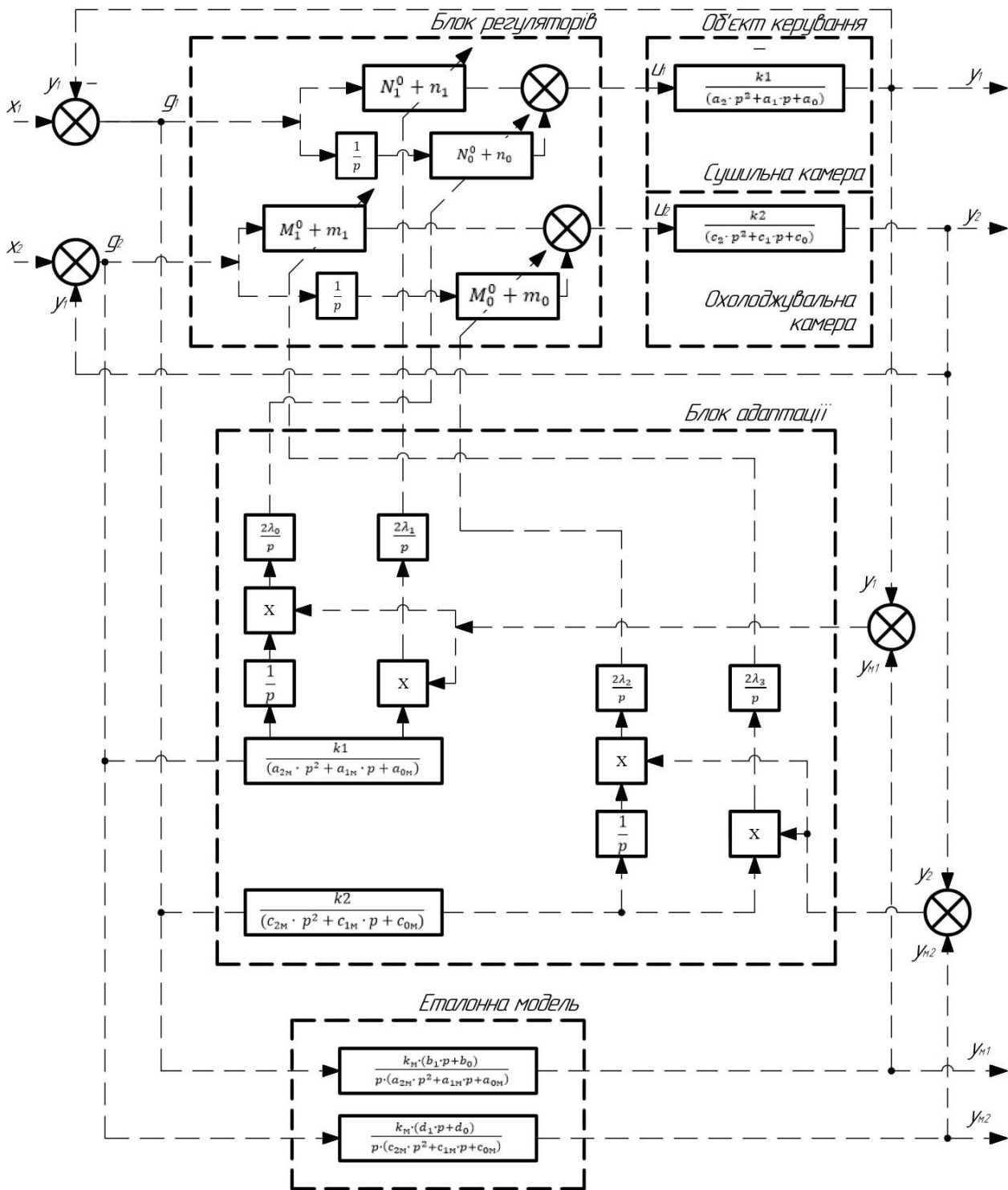


Рисунок 4.10 – Адаптивна система керування сушінням дисперсних матеріалів

В запропонованій системі поведінка основного контуру порівнюється з поведінкою еталонної моделі і задача пристрою адаптації полягає в мінімізації функції неузгодженсті їх станів шляхом зміни налаштувань регулятора основного контура.

### **Висновки**

У розділі зібрано основні характеристики системи адаптивного керування. Розраховано налаштування регуляторів для сушильної і охолоджувальної камер. Синтезовано контур адаптації для сушильної та охолоджувальної камер відповідно. Розроблено схему адаптивної системи керування сушінням дисперсних матеріалів.

## ВИСНОВКИ

В даному проекті розглянутий процес сушіння дисперсних матеріалів у багатотрубній сушильно–охолоджувальній установці. Проаналізовано технологічну схему процесу.

Розроблена схема автоматизації для сушіння дисперсних матеріалів, що використовує новітнє обладнання. Засоби автоматизації підібрані згідно технологічного регламенту. Схема обладнана контролером для зчитування інформації, реєстрації і контролю. На випадок аварій система або частково вимикається або повністю завершує роботу на деякий час.

Розглянуто основні режимні параметри об'єкта керування. Розраховано матеріальний та тепловий баланси. Розроблено математичні моделі для сушильної та охолоджувальної камер. Для розробки програмного модулю використано середовище розробки Visual Studio 2017. Код написано мовою програмування C# та з використанням технології .NET Framework 4.61. Реалізовано програмний продукт який здатен розраховувати матеріальні та теплові баланси, а також математичні моделі для сушильної та охолоджувальної.

Розглянуто основні характеристики системи адаптивного керування. Розраховано налаштування регуляторів для сушильної і охолоджувальної камер. Синтезовано контур адаптації для сушильної та охолоджувальної камер відповідно. Розроблено схему адаптивної системи керування сушінням дисперсних матеріалів.

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ**

1. Губарева В. В. Расчет и проектирование конвективных сушильных установок. Белгород: Изд-во БГТУ, 2014. 118с.
2. Гришин М.А., Атаназевич В.И., Семенов Ю.Г. Установки для сушки пищевых продуктов: справочник. Агропромиздат.1989.
3. Білецький В. С., Олійник Т. А., Смирнов В. О., Скляр Л. В. Техніка та технологія збагачення корисних копалин. Частина III. Заключні процеси. Кривий Ріг: Криворізький національний університет. 2019. 220 с.
4. Гартман Т. Н., Клушин Д. В. Основы компьютерного моделирования химико-технологических процессов: Учеб. пособие для вузов. ИКЦ «Академкнига», 2006. 416 с.
5. G. Tao, Adaptive Control Design and Analysis. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 2003.
6. V. V. Chalam Adaptive Control Systems: Techniques and Applications. CRC Press; 1st edition. 1987. 544p.
7. K. S. Narendra and A. M. Annaswamy, Stable Adaptive Systems. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1989; Dover Publications, 2004.
8. Гинзбург А.С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. 1973. 528 с.
9. Бурдо О.Г. Эволюция сушильных установок. Одесса: «Полиграф», 2010. 368 с.
10. Ладанюк А.П., Луцька Н.М., Кишенько В.Д., Власенко Л.О., Іващук В.В. Методи сучасної теорії управління: Підручник. Видавництво Ліра-К, 2019. 368 с.
11. S. Sastry and M. Bodson, Adaptive Control: Stability, Convergence and Robustness. Dover Publications, 2011
12. Трегуб В.Г. Проектування систем автоматизації. (Реком. МОН) Підручник. Видавництво Ліра-К, 2019. 344 с.
13. G. Feng , R. Lozano, Adaptive Control Systems. Newnes; 1st edition, 1999.

14. Лукінюк М. В. Автоматизація типових технологічних процесів: технологічні об'єкти керування та схеми автоматизації. К.: НТУУ «КПІ», 2008. 236 с.
15. Landau, I.D., Lozano, R., M'Saad, M., Karimi, A. Adaptive Control Algorithms, Analysis and Applications, 2011.
16. Ладанюк А.П., Заєць Н.А., Власенко Л.О. Сучасні технології конструювання систем автоматизації складних об'єктів (мережеві структури, адаптація, діагностика та прогнозування): монографія- К.: Видавництво Ліра\_К, 2016. 312 с.
17. Бойко Т. В., Абрамова А. О., Складанний Д. М., Пшеничний М.Л. Особливості сушильно-охолоджувальної установки як об'єкта керування. Збірник наукових статей Восьмої міжнародної науково-практичної конференції «Комп'ютерне моделювання в хімії і та технологіях і системах сталого розвитку – КМХТ2020», Київ 19-22 травня 2020 року. Київ, 2020. С.182-186.
18. Датчики давления.URL: [http://proton-st.ru/datchiki\\_davleniya\\_wika](http://proton-st.ru/datchiki_davleniya_wika)
19. Автоматика Siemens.URL: <http://www.vec-ing.ru/?do=menu&id=5234>
20. Датчики температур. URL: <http://geekmatic.in.ua>
21. Пшеничний М.Л., Безносик Ю. О. Аналіз режимних параметрів сушильно–охолоджувальної установки. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2021: Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів (АКІТ – 2021); м. Київ, 21–22 квітня 2021 р. С.7-8.
22. Математичне моделювання та оптимізація об'єктів хімічної технології: метод. вказівки до виконання лабораторних робіт для студ. напряму підготовки 6.051301 «Хімічна технологія» [Електронний ресурс] / [уклад. Бойко Т. В., Фоглер О.М., Абрамова А.О.]. К: 2014. 162 с. Систем. вимоги: Pentium; 256 Mb RAM; Windows 2000, XP, Vista; MS Word 97-2003 – Назва з екрану.

23. Бойко Т. В. До питання математичного моделювання сушильно-охолоджувальної установки у виробництві цукру / Т. В. Бойко, А. О. Абрамова, М. Л. Пшеничний // Матеріали другої міжнародної науково-практичної конференції «Інтеграційні та інноваційні напрями розвитку харчової індустрії». Том І. вид. ФОП Гордієнко Є.І., Черкаси, 2019. 33–37 с.
24. Расчет и проектирование сушильных аппаратов: 16с .
25. Бойко Т.В., Пшеничний М.Л. До питання автоматизації сушіння кристалічних матеріалів. VIII Міжнародна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених з хімії та хімічної технології, 22-23 квітня 2020, Київ. 100с.
26. Пшеничний М. Л., Безносик Ю. О., Бугаєва Л. М. Конструювання автоматизації складних технологічних об'єктів з урахуванням систем адаптивного керування. Контроль і управління в складних системах (КУСС-2020). XV Міжнародна конференція. Тези доповідей. Вінниця, 8-10 жовтня 2020 року. Вінниця: ВНТУ. 2020. 20-22 с. ISBN 978-966-641-813-3.
27. Бондаренко С. Г., Сангінова О. В. Теорія автоматичного керування: метод. вказівки і завд. до викон. домашньої контр. роб. та самостійної роботи для студ. напр. підг. 6.050202 “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”
28. Тютюнник А.Г. Оптимальні і адаптивні системи автоматичного керування Житомир: ЖІТІ, 1998. 512 с.

## **ДОДАТКИ**

## Додаток А

## Специфікація устаткування

Позиція на схемі	Назва параметра	Місце відбору інформації	Граничне значення параметра	Місце монтажу	Назва, технічна характеристика	Тип, марка моделі	Завод-виробник	К-ть
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1а, 2а, 3а, 4а, 5а, 6а	Витрата	Трубопровід		Трубопровід	Вихровий витратомір Клас точності 0.75. Температура вимірюваного середовища від -40 до 240 °С Вих. сигнал 4 – 20 мА.	OPTISWIRL 4070	KROHNE, Україна, м.Київ	6
7а, 8а, 9а, 10а, 11а, 12а, 13а	Температура	Трубопровід	130 °С	Трубопровід	Термоперетворювач опору мідний, НСХ 50М, діапазон вимірювання -50...+150 °С, діапазон умовних тисків 0,4 МПа, інерційність 15 с, клас допуску В	TCM-1088	НВО «Електротермія», Приладобудівний з-д, м. Луцьк	7
14а, 15а, 16а, 17а		Двигуни	400 °С	Двигун	Цифровий термометр Клас точності 0.5. Температура вимірюваного середовища від -20 до 400 °С Вих. сигнал 4 – 20 мА.	DTM	Німеччина	4
HL1, HL2				Щит керування	Лампа сигнальна світлодіодна із червоним індикатором, U жив = =220 В, 50/60 Гц	AD16-16E	EKF PROxima, Росія	2

## Продовження до додатку А

18а, 19а	Тиск		0,16МПа		Датчик тиску WІКА Діапазон вимірювання від 0 до 0,16МПа Клас точності 0.5 Вих. сигнал 4 – 20 мА.	WІКА	WІКА, Німеччина	2
SB1, SB2, SB3, SB4, SB5, SB6, SB7, SB8, SB9, SB10, SB11, SB12, SB13, SB14, SB15, SB16, SB17, SB18,	Витрата	Устаткування М – 1, М – 2, М – 3, М – 4, М – 5, М – 6, М – 7, М – 8		Щит керування	Пост керування кнопковий, кількість елементів управління – 2 Номинальна напруга ізоляції (за змінного струму частотою 50/60 Гц) 660 В, номінальний тепловий струм 10 А; температура довкілля від (-40) °С до 40 °С, відносна вологість повітря 98 %, комутаційна зносостійкість 1 000 000 циклів	ПКУ 15-21-131-УЗ	ЗАТ «Променергоавтоматика», м. Київ	22
SA1, SA2, SA3, SA4, SA5, SA6, SA7, SA8, SA9, SA10, SA11				Місцевий	Кнопка запобіжного вимикання Номінальна робоча напруга: змінна (частота 50...60 Гц) 660 В, постійна – 440 В, номінальний тепловий струм – 10А	КМЕ-5111 УЗ	ТОВ «Кам'янецьПоділький електромеханічний завод», м. Кам'янець Подільський	11

## Продовження до додатку А

МП1, МП2, МП3, МП4, МП5, МП6, МП7, МП8,				Місцевий	Пускач магнітний безконтактний нереверсивний I=160А, робоча напруга 220...380 В, потужність 45 кВт	ПМ- 12160210 УЧВ	ВО «Электро-прибор», м.Чебоксари	11
HL3, HL5, HL7, HL9, HL11, HL13, HL15, HL17,				Щит керування	Лампа сигнальна світлодіодна з зеленим індикатором («ПУСК»), Uжив=220 В, 50/60 Гц, d = 27 мм, сила світла 20 мКд	AD16-16E	EKF PROxima, Росія	11
HL4, HL6, HL8, HL10, HL12, HL14, HL16, HL18				Щит керування	Лампа сигнальна світлодіодна з зеленим індикатором («СТОП»), Uжив=220 В, 50/60 Гц, d = 27 мм, сила світла 20 мКд	AD16-16E	EKF PROxima, Росія	11
1-176, 18а, 19а				Місцеві	Модуль введення аналогових сигналів Число аналогових входів:8 Вихідний сигнал: 4 – 20 мА; Напруга нагрзки: 24 V	AD9481	Німеччина	3
1в, 2в, 3в, 4в, 12в, 13в				Місцеві	Модуль виведення аналогових сигналів Число аналогових входів:8 Вихідний сигнал: 4 – 20 мА; Напруга нагрзки: 24 V	AD9122	Німеччина	1

## Продовження до додатку А

1-19				Контролер	Мікроконтролер Напруга: 120/230В Використовує до 32 сигнальних і функціональних модулів Призначений для управління процесом	Siemens Simatic S7- 300	Siemens, Німеччина	1
------	--	--	--	-----------	---	-------------------------------	--------------------	---

### Документ MathCad. Розрахунок матеріальних та теплових балансів

1. Маса висушеного дисперсного матеріалу,	$G_f := 13.889 \text{ кг/с}$
2. Початкова вологість матеріалу	$\omega_s := 0.8 \text{ \%}$
3. Початкова вологість матеріалу	$\omega_f := 0.05 \text{ \%}$
4. Початкова температура дисперсного матеріалу	$T_{sm} := 65 \text{ }^\circ\text{C}$
5. Кінцева температура дисперсного матеріалу	$T_{fm} := 25 \text{ }^\circ\text{C}$
6. Температура сушильного агента перед калорифером	$T_{a0} := 20 \text{ }^\circ\text{C}$
7. Температура сушильного агента після калорифера	$T_{a1} := 90 \text{ }^\circ\text{C}$
8. Температура сушильного агента після сушіння	$T_{a2} := 50 \text{ }^\circ\text{C}$
9. Відносна вологість сушильного агента після калорифера	$\phi_{a0} := 65 \text{ \%}$
10. Відносна вологість сушильного агента після сушіння	$\phi_{a1} := 30 \text{ \%}$
11. Густина сушильного та охолоджувального агентів	$\rho_a := 0.987 \text{ кг/м}^3$
12. Температура матеріалу перед охолодженням	$T_{csm} := 60.3$
13. Температура матеріалу після охолодження	$T_{cfm} := 25$

**Матеріальний баланс виражається рівняннями:**

1. По всьому матеріалу, що підлягає висушуванню:  $G_s = G_f + W$
2. По абсолютно сухій речовині в висушуваному матеріалі:  $G_s = \frac{100 - \omega_s}{100} = G_f \cdot \frac{100 - \omega_f}{100}$

$$G_s := G_f \cdot \frac{100 - \omega_f}{100 - \omega_s} = 13.994$$

Метою складання матеріального балансу є визначення маси води  $W$ , що видаляється при сушінні матеріалу

3. Маса води, виділяемої з матеріалу при сушінні  $W := G_s - G_f = 0.105$

Для визначення кількості потрібного сушильного агента для сушіння дисперсного матеріалу по параметрам сушильного агента перед калорифером  $T_{a0} = 20$ ,  $\phi_{a0} = 65$  за допомогою діаграми I-x для вологого сушильного агента знаходимо його вологість:  $x_0 := 0.01$

**При нагріванні в калорифері вологість повітря не змінюється.**

По I-x діаграмі знаходимо вогоміст повітря після сушарки:  $x_2 := 0.025$

**Матеріальний баланс по воді має вигляд**  $L \cdot x_0 + W = L \cdot x_2$

З рівняння балансу визначаємо витрату сохого сушильного агента на сушарку:

$$L := \frac{W}{x_2 - x_0} = 7.001 \text{ кг/с} \quad L_{ha} := L \cdot 3600 = 2.52 \times 10^4 \text{ кг/год}$$

## Продовження до додатку Б

Об'ємна витрата сушильного агенту при температурі 20 градусів:

$$V_{\text{пов}} := \frac{L_{\text{ha}}}{\rho_a} = 2.553 \times 10^4 \text{ м}^3/\text{год}$$

Визначаємо потрібну кількість охолоджувального агенту для охолодження 1кг дисперсного матеріалу по такій формулі:

По I-d діаграмі знаходимо вогоміст агенту перед калорифером для охолодження матеріалу:

$$d_0 := 10 \text{ г вологи/кг сухого повітря}$$

$$L' := \frac{0.25(T_{\text{csm}} - T_{\text{cfm}})}{\left(0.24 + 0.47 \cdot \frac{d_0}{1000}\right)(T_{\text{a2}} - T_{\text{a0}})} = 1.202$$

Секундна витрата охолоджувального агенту на охолодження:

$$L_{\text{cas}} := L' \cdot G_f = 16.697$$

Для охолодження 50 т/год дисперсного матеріалу матеріалу потрібно охолоджувального агенту

$$L_{\text{ca}} := G_f \cdot L' \cdot 3600 = 6.011 \times 10^4$$

Об'ємна витрата охолоджувального агенту для охолодження дисперсного матеріалу:

$$V_{\text{ca}} := \frac{L_{\text{ca}}}{\rho_a} = 6.09 \times 10^4$$

## Документ MathCad. Розрахунок сушильної камери

**Вихідні дані:**

1. Початкова температура гарячого сушильного агенту	$T_{1a} := 90 \text{ } ^\circ\text{C}$
2. Початкова вологість сушильного агенту	$D_{1a} := 0.01 \text{ кг/кг}$
3. Густина сушильного агенту	$\rho_a := 0.917 \text{ кг/м}^3$
4. Початкова температура матеріалу	$T_{1m} := 60 \text{ } ^\circ\text{C}$
5. Початкова вологість матеріалу	$W_{1m} := 0.08 \text{ кг/кг}$
6. Густина матеріалу	$\rho_m := 650 \text{ кг/м}^3$
7. Теплоємність матеріалу	$c_m := 1550 \text{ Дж/кг}^\circ\text{C}$
8. Діаметр труби установки	$d_{\text{tube}} := 1.3 \text{ м}$
9. Коефіцієнт сушіння	$K_d := 0.1$
10. Коефіцієнт тепловіддачі від сушильного агенту	$\alpha_{am} := 0.74$
11. Рівноважна вологість	$W_r := 0.005 \text{ кг/кг}$
12. Поверхня матеріалу	$F_m := 724 \text{ м}^2$
13. Довжина сушильних труб	$l_{\text{tube}} := 9 \text{ м}$
14. Витрати сушильного агенту	$L_a := 7.001 \text{ кг/с}$
15. Витрати матеріалу	$L_m := 13.889 \text{ кг/с}$

**Результати розрахунку параметрів конвективної сушки:**

1. Площа поперечного перерізу установки	$S_{db} := \frac{\pi \cdot d_{\text{tube}}^2}{4} \cdot 6 = 7.964 \text{ м}^2$
2. Об'єм сушильної камери	$V_{db} := S_{db} \cdot l_{\text{tube}} = 71.675 \text{ м}^3$
3. Маса сушильного агенту	$M_a := L_a \cdot 60 \cdot 15 = 6.301 \times 10^3 \text{ кг}$
4. Маса матеріалу	$M_m := L_m \cdot 60 \cdot 15 = 1.25 \times 10^4 \text{ кг}$

**Розрахунок математичної моделі:**

1. Ентальпія повітря при початковій температурі повітря і початковій вологості сушильного агенту	$h_1 := (1.004 \cdot T_{1a} + 2500 \cdot D_{1a} + D_{1a} \cdot 1.84 \cdot T_{1a}) = 117.016$
--	--

ORIGIN := 1

2. Початкові дані для розрахунку математичної моделі

$$\mathbf{x0} := \begin{pmatrix} 90 \\ 0.01 \\ 0.06 \\ 60 \end{pmatrix}$$

3. Спрощення формул математичної моделі через заміни

$$A_{\text{koef}} := \frac{\alpha_{\text{am}} \cdot F_{\text{m}}}{2 \cdot M_{\text{a}}} = 0.043 \quad B_{\text{koef}} := \frac{K_{\text{d}} \cdot F_{\text{m}}}{M_{\text{m}}} = 5.792 \times 10^{-3}$$

$$C_{\text{koef}} := \frac{\alpha_{\text{am}} \cdot F_{\text{m}}}{2 \cdot c_{\text{m}} \cdot M_{\text{m}}} = 1.383 \times 10^{-5} \quad D_{\text{koef}} := \frac{L_{\text{a}}}{M_{\text{a}}} = 1.111 \times 10^{-3}$$

$$f(t, \mathbf{x}) := \begin{bmatrix} \frac{1}{1.004 + 1.84 \cdot x_2} \left[ D_{\text{koef}} (x_1 + 2500 \cdot x_2 + 1.84 \cdot x_1 \cdot x_2) - D_{\text{koef}} \cdot h_1 - 2 \cdot A_{\text{koef}} \left( \frac{T_{1\text{a}} + x_1}{2} - \frac{T_{1\text{m}} + x_4}{2} \right) + 2500 \cdot \left[ \frac{M_{\text{m}}}{M_{\text{a}}} (B_{\text{koef}} \cdot x_3 + B_{\text{koef}} \cdot W_{\text{r}}) \right] - 1.84 \cdot x_1 \left[ \frac{M_{\text{m}}}{M_{\text{a}}} (B_{\text{koef}} \cdot x_3 + B_{\text{koef}} \cdot W_{\text{r}}) \right] \right] \\ \frac{M_{\text{m}}}{M_{\text{a}}} (B_{\text{koef}} \cdot x_3 + B_{\text{koef}} \cdot W_{\text{r}}) \\ - B_{\text{koef}} \cdot x_3 + B_{\text{koef}} \cdot W_{\text{r}} \\ C_{\text{koef}} \cdot T_{1\text{a}} + C_{\text{koef}} \cdot x_1 - C_{\text{koef}} \cdot T_{1\text{m}} - C_{\text{koef}} \cdot x_4 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J} := \text{rkfixed}(\mathbf{x0}, 0, 900, 100, \mathbf{f})$$

	1	2	3	4	5
64	567	48.442	0.18	$7.061 \cdot 10^{-3}$	60.198
65	576	48.448	0.181	$6.957 \cdot 10^{-3}$	60.201
66	585	48.457	0.183	$6.857 \cdot 10^{-3}$	60.203
67	594	48.47	0.184	$6.763 \cdot 10^{-3}$	60.205
68	603	48.486	0.185	$6.673 \cdot 10^{-3}$	60.207
69	612	48.505	0.186	$6.588 \cdot 10^{-3}$	60.21
70	621	48.526	0.187	$6.508 \cdot 10^{-3}$	60.212
71	630	48.55	0.189	$6.431 \cdot 10^{-3}$	60.214
72	639	48.577	0.19	$6.358 \cdot 10^{-3}$	60.216
73	648	48.606	0.191	$6.289 \cdot 10^{-3}$	60.219
74	657	48.637	0.192	$6.224 \cdot 10^{-3}$	60.221
75	666	48.67	0.193	$6.162 \cdot 10^{-3}$	60.223
76	675	48.706	0.194	$6.103 \cdot 10^{-3}$	60.226
77	684	48.743	0.196	$6.047 \cdot 10^{-3}$	60.228
78	693	48.783	0.197	$5.994 \cdot 10^{-3}$	60.23
79	702	48.824	0.198	$5.943 \cdot 10^{-3}$	60.233
80	711	48.867	0.199	$5.895 \cdot 10^{-3}$	60.235
81	720	48.911	0.2	$5.85 \cdot 10^{-3}$	60.237
82	729	48.957	0.201	$5.807 \cdot 10^{-3}$	60.24
83	738	49.004	0.202	$5.766 \cdot 10^{-3}$	60.242
84	747	49.053	0.204	$5.727 \cdot 10^{-3}$	...

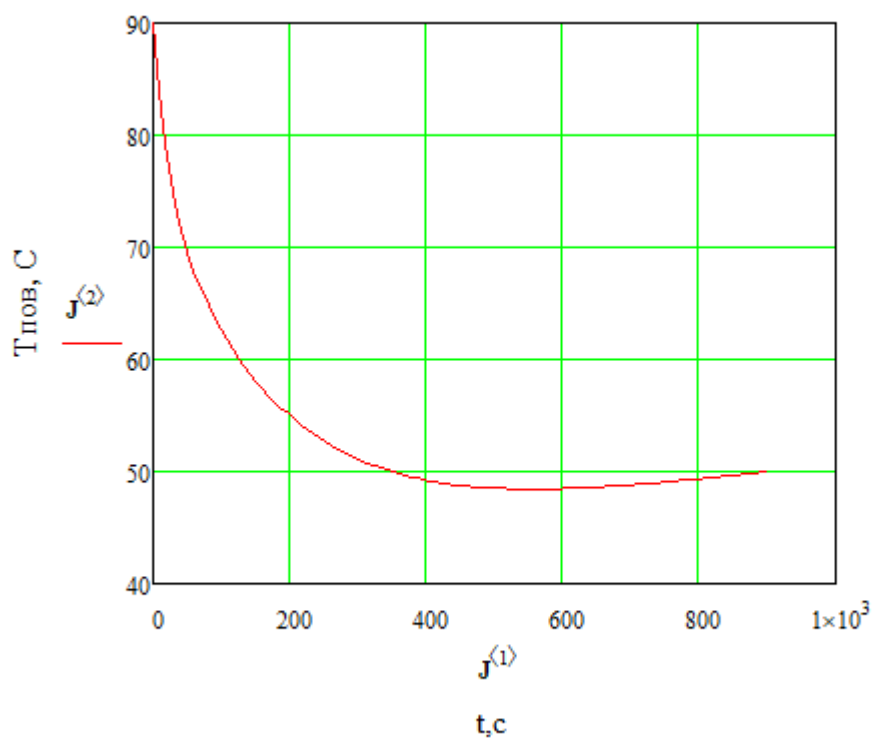


Рис. В.1 - Крива зміни температури сушильного агенту

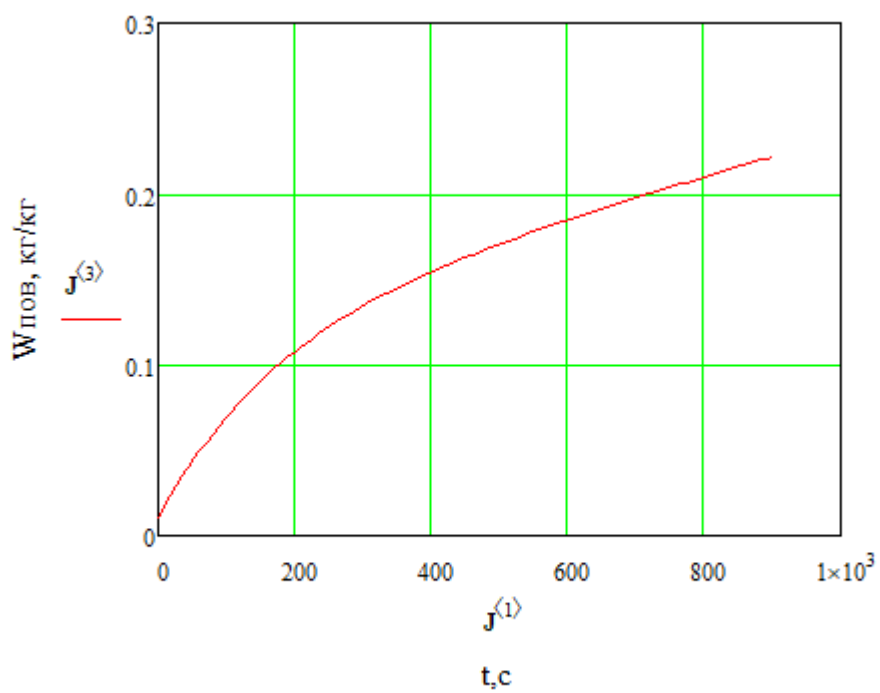


Рис. В.2 - Крива зміни вологості сушильного агенту

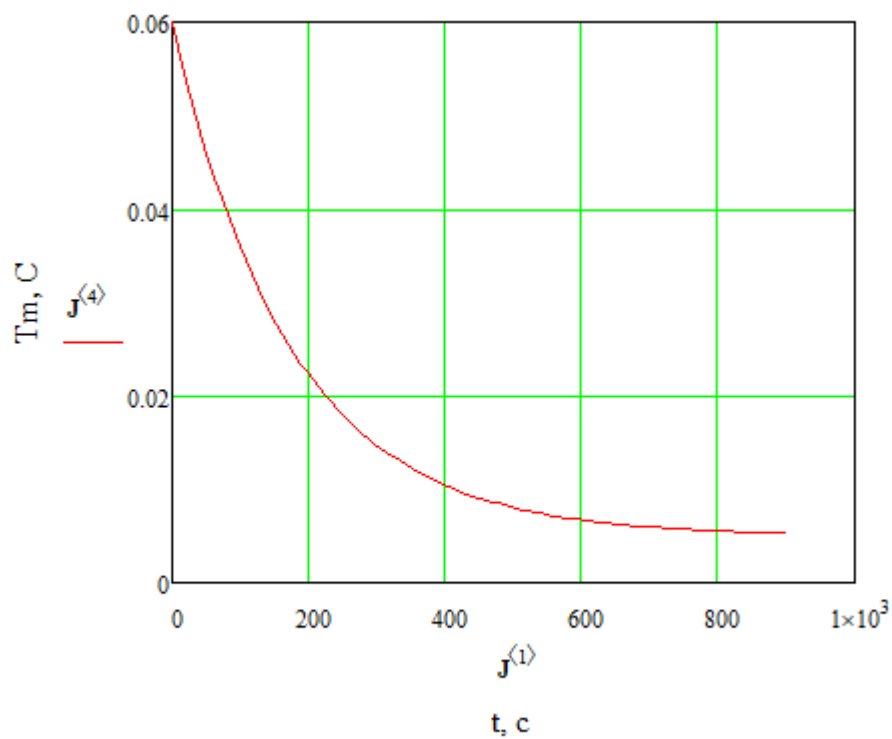


Рис. В.3 - Крива зміни температури матеріалу

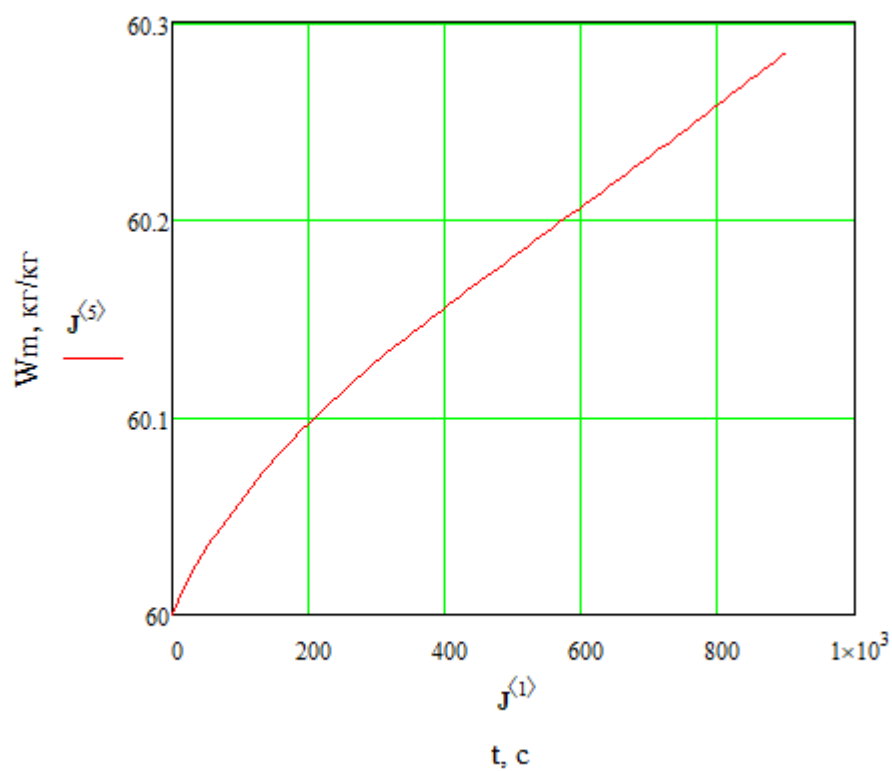


Рис. В.4 - Крива зміни вологості матеріалу

## Документ MathCad. Розрахунок охолоджувальної камери

1. Теплоємність дисперсного матеріалу	$C_m := 1550 \text{ Дж/кг}^\circ\text{C}$
2. Теплоємність охолоджувального агенту	$C_a := 1005 \text{ Дж/кг}^\circ\text{C}$
3. Швидкість дисперсного матеріалу	$v_m := 0.4 \text{ м/с}$
4. Швидкість охолоджувального агенту	$v_a := 2.7 \text{ м/с}$
5. Об'єм дисперсного матеріалу	$V_m := 15.23 \text{ м}^3$
6. Об'єм охолоджувального агенту	$V_a := 1040 \text{ м}^3$
7. Температура дисперсного матеріалу	$T_{sm} := 60.3 \text{ }^\circ\text{C}$
8. Температура охолоджувального агенту	$T_{sa} := 25 \text{ }^\circ\text{C}$
9. Поверхня теплообміну	$F := 724 \text{ м}^2$

## Результати розрахунку параметрів для охолодження матеріалу

$$1. \text{ Коефіцієнт тепловіддачі } \underline{K} := 3.25 \cdot \frac{(0.972 \cdot 2.7)^{0.8}}{1.3^{0.2}} = 6.673$$

## Результати розрахунку параметрів для охолодження матеріалу

$$1. \text{ Коефіцієнт тепловіддачі } \underline{K} := 3.25 \cdot \frac{(0.972 \cdot 2.7)^{0.8}}{1.3^{0.2}} = 6.673$$

## Розрахунок математичної моделі

$$1. \text{ Початкові дані для розрахунку математичної моделі } \underline{T} := \begin{pmatrix} 60.3 \\ 55 \end{pmatrix}$$

$$\text{Model}(t, T) := \begin{bmatrix} \frac{v_m \cdot C_m \cdot (T_{sm} - T_0) - F \cdot K \cdot (T_0 - T_1)}{V_m \cdot C_m} \\ \frac{v_a \cdot C_a \cdot (T_{sa} - T_0) - F \cdot K \cdot (T_0 - T_1)}{V_a \cdot C_a} \end{bmatrix}$$

$$\text{Culculate} := \text{rkfixed}(T, 0, 900, 100, \text{Model})$$

Продовження до додатку Г

	0	1	2
0	0	60.3	55
1	9	56.661	54.154
2	18	54.99	53.381
3	27	53.996	52.642
4	36	53.239	51.922
5	45	52.569	51.215
6	54	51.936	50.522
<b>Calculate =</b>	7	63	49.839
	8	72	49.168
	9	81	48.508
	10	90	47.859
	11	99	47.22
	12	108	46.592
	13	117	45.974
	14	126	45.366
	15	135	46.789
			...

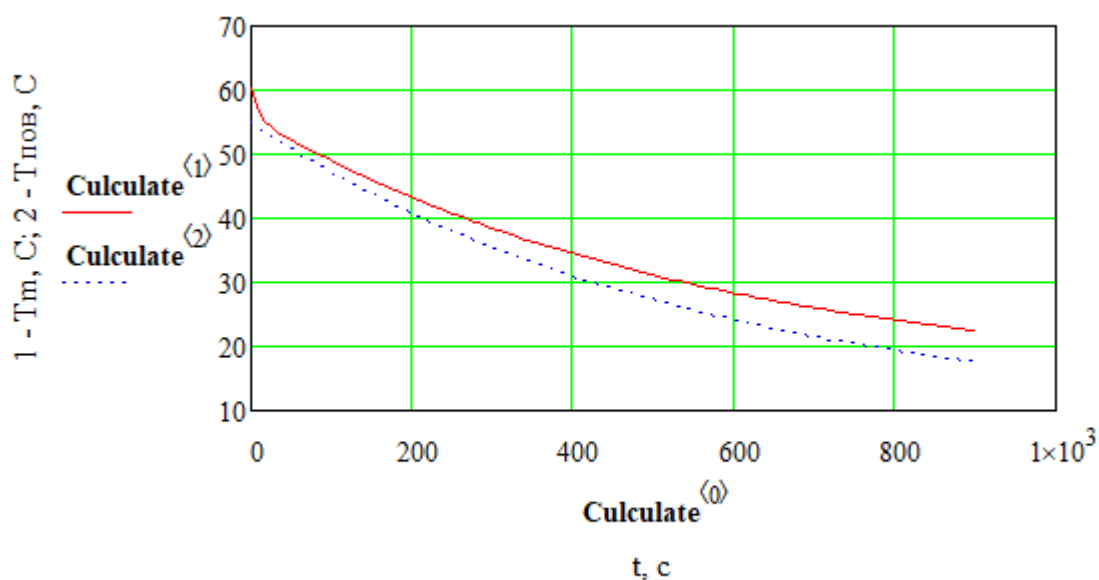


Рис. Г.1 - Криві зміни температури охолоджувального агента і матеріалу

**Лістинг програмного модулю для розрахунку матеріальних та теплових балансів, математичних моделей для сушильної та охолоджувальної камер**

```

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
using System.Windows.Forms;

namespace Diploma
{
    public partial class Form3 : Form
    {
        Form2 Acces_to_Form2 = new Form2();
        Form4 Acces_to_Form4 = new Form4();
        public Form3()
        {
            InitializeComponent();
        }

        private void завершитиРоботуToolStripMenuItem_Click(object sender, EventArgs e)
        {
            this.Close();
        }

        private void menu_automatization_Click(object sender, EventArgs e)
        {
            Acces_to_Form2.ShowDialog();
        }

        private void довідкаToolStripMenuItem_Click(object sender, EventArgs e)
        {
            Acces_to_Form4.ShowDialog();
        }

        private void матеріальнийБалансToolStripMenuItem_Click(object sender, EventArgs
e)
        {
            gmat.Text = "13,889";
            wsm.Text = "0,8";
            wfm.Text = "0,05";
            Fisa.Text = "65";
            Fifa.Text = "30";
            romat.Text = "0,917";
            Tsm.Text = "60";
            Tfm.Text = "25";
            Tair.Text = "20";
        }
    }
}

```

## Продовження до додатку Д

```

    Thair.Text = "90";
    Tsair.Text = "50";
    Tcmat.Text = "60,3";
    Cmat.Text = "1550";
    Cwat.Text = "4190";
}
private void сушильнаКамераToolStripMenuItem_Click(object sender, EventArgs e)
{
    Tvh.Text = "90";
    da.Text = "0,01";
    roa.Text = "0,917";
    Tm3.Text = "60";
    dm.Text = "0,08";
    rom.Text = "650";
    ca.Text = "1005";
    cm.Text = "1550";
    ga.Text = "7,001";
    gm.Text = "13,889";
    wr.Text = "0,005";
    Ks.Text = "0,1";
    A.Text = "0,74";
    E.Text = "724";
    L.Text = "9";
    sh.Text = "6";
    dtr.Text = "1,3";
    ds.Text = "1";
}
private void menu_cold_box_text_Click(object sender, EventArgs e)
{
    v1.Text = "0,4";
    v2.Text = "2,7";
    c1.Text = "1550";
    c2.Text = "1006";
    F.Text = "724";
    dl.Text = "1";
    d55.Text = "1,3";
    Tvh44.Text = "55";
    Tm44.Text = "60,3";
    Va.Text = "1040";
    Vm.Text = "15,23";
}
private void збергтиToolStripMenuItem_Click(object sender, EventArgs e)
{
    gmat.Text = "";
    wsm.Text = "";
    wfm.Text = "";
    Fisa.Text = "";
    Fifa.Text = "";
    romat.Text = "";
    Tsm.Text = "";
}

```

## Продовження до додатку Д

```

Tfm.Text = "";
Tair.Text = "";
Thair.Text = "";
Tsair.Text = "";
Tcmat.Text = "";
Cmat.Text = "";
Cwat.Text = "";
Tvh.Text = "";
da.Text = "";
roa.Text = "";
Tm3.Text = "";
dm.Text = "";
rom.Text = "";
ca.Text = "";
cm.Text = "";
ga.Text = "";
gm.Text = "";
wr.Text = "";
Ks.Text = "";
A.Text = "";
E.Text = "";
L.Text = "";
sh.Text = "";
dtr.Text = "";
ds.Text = "";
v1.Text = "";
v2.Text = "";
c1.Text = "";
c2.Text = "";
F.Text = "";
dl.Text = "";
d55.Text = "";
Tvh44.Text = "";
Tm44.Text = "";
Va.Text = "";
Vm.Text = "";
tepbal.Text = "";
matbal.Text = "";
dataGridView1.Rows.Clear();
dataGridView2.Rows.Clear();
chart1.Series[0].Points.Clear();
chart1.Series[1].Points.Clear();
chart2.Series[0].Points.Clear();
chart3.Series[0].Points.Clear();
chart4.Series[0].Points.Clear();
}

```

```

double gmat_0, wsm_0, wfm_0, fisa_0, fifa_0, romat_0, Tsm_0, Tfm_0, Tair_0,
Thair_0, Tsair_0, Tcmat_0, Cmat_0, Cwat_0;

```

```

private void menu_tepbal_Click(object sender, EventArgs e)

```

```

{
  gmat_0 = Convert.ToDouble(gmat.Text);
  wsm_0 = Convert.ToDouble(wsm.Text);
  wfm_0 = Convert.ToDouble(wfm.Text);
  fisa_0 = Convert.ToDouble(Fisa.Text);
  fifa_0 = Convert.ToDouble(Fifa.Text);
  romat_0 = Convert.ToDouble(romat.Text);
  Tsm_0 = Convert.ToDouble(Tsm.Text);
  Tfm_0 = Convert.ToDouble(Tfm.Text);
  Tair_0 = Convert.ToDouble(Tair.Text);
  Thair_0 = Convert.ToDouble(Thair.Text);
  Tsair_0 = Convert.ToDouble(Tsair.Text);
  Tcmat_0 = Convert.ToDouble(Tcmat.Text);
  Cmat_0 = Convert.ToDouble(Cmat.Text);
  Cwat_0 = Convert.ToDouble(Cwat.Text);

  double xi0 = 0.01, xi2 = 0.025;

  double Gs = gmat_0 * ((100 - wfm_0) / (100 - wsm_0));
  double W = Gs - gmat_0;
  double Gair = W / (xi2 - xi0);
  double Gcair = (((0.25 * (Tcmat_0 - Tfm_0)) / ((0.24 + 0.47 * (10 / 1000)) * (Tsair_0
- Tair_0))) * gmat_0;
  double Kos = (((Gair + Gcair) * 113000) + (gmat_0 * Cmat_0 * Tfm_0) - (Gair *
47000) - (Gcair * 47000) - (gmat_0 * Cmat_0 * Tsm_0) - (W * Tsm_0 * Cwat_0)) / 0.94;
  double Sumv = (Gair * 47000) + (Gcair * 47000) + (gmat_0 * Cmat_0 * Tsm_0) +
(W * Tsm_0 * Cwat_0) + Kos;
  double Sumvuh = (gmat_0 * Cmat_0 * Tfm_0) + ((Gair + Gcair) * 113000) + (Kos *
0.06);

  tepbal.Text += "Тепловий баланс виражається рівняннями:" + "\r\n";
  tepbal.Text += "1. З сушильним агентом" + "\r\n";
  tepbal.Text += "Gair * I0 = " + (Gair * 47000) + "\r\n";
  tepbal.Text += "2. З охолоджувальним агентом" + "\r\n";
  tepbal.Text += "Gcair * I0 = " + (Gcair * 47000) + "\r\n";
  tepbal.Text += "3. З вологим матеріалом в тому числі з абсолютно сухим
матеріалом" + "\r\n";
  tepbal.Text += "Gf * Cm * Tsm = " + (gmat_0 * Cmat_0 * Tsm_0) + "\r\n";
  tepbal.Text += "4. З вологою що випарюється з матеріалу" + "\r\n";
  tepbal.Text += "W * Cw * Tsm = " + (W * Tsm_0 * Cwat_0) + "\r\n";
  tepbal.Text += "5. З відпрацюваним повітрям" + "\r\n";
  tepbal.Text += "(Gair + Gcair)*I2 = " + ((Gair + Gcair) * 113000) + "\r\n";
  tepbal.Text += "6. З висушеним матеріалом" + "\r\n";
  tepbal.Text += "Gf * Cm * Tsm = " + (gmat_0 * Cmat_0 * Tfm_0) + "\r\n";
  tepbal.Text += "7. В основному калорифері" + "\r\n";
  tepbal.Text += "Qk = " + Kos + "\r\n";
  tepbal.Text += "8. Об'ємна витрата охолоджувального агента при температурі 20
C" + "\r\n";

  tepbal.Text += "Qvtr = " + (Kos * 0.06) + "\r\n";
  tepbal.Text += "-----" + "\r\n";
  tepbal.Text += "Сума вхід: " + Sumv + "\r\n";

```

## Продовження до додатку Д

```

terbal.Text += "-----" + "\r\n";
terbal.Text += "Сума вихід: " + Sumvuh + "\r\n";
terbal.Text += "-----" + "\r\n";
}

private void button2_Click(object sender, EventArgs e)
{
    gmat_0 = Convert.ToDouble(gmat.Text);
    wsm_0 = Convert.ToDouble(wsm.Text);
    wfm_0 = Convert.ToDouble(wfm.Text);
    fisa_0 = Convert.ToDouble(Fisa.Text);
    fifa_0 = Convert.ToDouble(Fifa.Text);
    romat_0 = Convert.ToDouble(romat.Text);
    Tsm_0 = Convert.ToDouble(Tsm.Text);
    Tfm_0 = Convert.ToDouble(Tfm.Text);
    Tair_0 = Convert.ToDouble(Tair.Text);
    Thair_0 = Convert.ToDouble(Thair.Text);
    Tsair_0 = Convert.ToDouble(Tsair.Text);
    Tcmat_0 = Convert.ToDouble(Tcmat.Text);
    Cmat_0 = Convert.ToDouble(Cmat.Text);
    Cwat_0 = Convert.ToDouble(Cwat.Text);

    double xi0 = 0.01, xi2 = 0.025;

    double Gs = gmat_0 * ((100 - wfm_0) / (100 - wsm_0));
    double W = Gs - gmat_0;
    double Gair = W / (xi2 - xi0);
    double Gcair = ((0.25 * (Tcmat_0 - Tfm_0)) / ((0.24 + 0.47 * (10 / 1000)) * (Tsair_0
- Tair_0))) * gmat_0;
    double Kos = (((Gair + Gcair) * 113000) + (gmat_0 * Cmat_0 * Tfm_0) - (Gair *
47000) - (Gcair * 47000) - (gmat_0 * Cmat_0 * Tsm_0) - (W * Tsm_0 * Cwat_0)) / 0.94;
    double Sumv = (Gair * 47000) + (Gcair * 47000) + (gmat_0 * Cmat_0 * Tsm_0) +
(W * Tsm_0 * Cwat_0) + Kos;
    double Sumvuh = (gmat_0 * Cmat_0 * Tfm_0) + ((Gair + Gcair) * 113000) + (Kos *
0.06);

    terbal.Text += "Тепловий баланс виражається рівняннями:" + "\r\n";
    terbal.Text += "1. З сушильним агентом" + "\r\n";
    terbal.Text += "Gair * I0 = " + (Gair * 47000) + "\r\n";
    terbal.Text += "2. З охолоджувальним агентом" + "\r\n";
    terbal.Text += "Gcair * I0 = " + (Gcair * 47000) + "\r\n";
    terbal.Text += "3. З вологим матеріалом в тому числі з абсолютно сухим
матеріалом" + "\r\n";
    terbal.Text += "Gf * Cm * Tsm = " + (gmat_0 * Cmat_0 * Tsm_0) + "\r\n";
    terbal.Text += "4. З вологою що випарюється з матеріалу" + "\r\n";
    terbal.Text += "W * Cw * Tsm = " + (W * Tsm_0 * Cwat_0) + "\r\n";
    terbal.Text += "5. З відпрацюваним повітрям" + "\r\n";
    terbal.Text += "(Gair + Gcair)*I2 = " + ((Gair + Gcair) * 113000) + "\r\n";
    terbal.Text += "6. З висушеним матеріалом" + "\r\n";
    terbal.Text += "Gf * Cm * Tsm = " + (gmat_0 * Cmat_0 * Tfm_0) + "\r\n";
    terbal.Text += "7. В основному калорифері" + "\r\n";

```

## Продовження до додатку Д

```

    tepbal.Text += "Qk = " + Kos + "\r\n";
    tepbal.Text += "8. Об'ємна витрата охолоджувального агенту при температурі 20
C" + "\r\n";
    tepbal.Text += "Qvtr = " + (Kos * 0.06) + "\r\n";
    tepbal.Text += "-----" + "\r\n";
    tepbal.Text += "Сума вхід: " + Sumv + "\r\n";
    tepbal.Text += "-----" + "\r\n";
    tepbal.Text += "Сума вихід: " + Sumvuh + "\r\n";
    tepbal.Text += "-----" + "\r\n";
}

private void menu_matbal_Click(object sender, EventArgs e)
{
    gmat_0 = Convert.ToDouble(gmat.Text);
    wsm_0 = Convert.ToDouble(wsm.Text);
    wfm_0 = Convert.ToDouble(wfm.Text);
    fisa_0 = Convert.ToDouble(Fisa.Text);
    fifa_0 = Convert.ToDouble(Fifa.Text);
    romat_0 = Convert.ToDouble(romat.Text);
    Tsm_0 = Convert.ToDouble(Tsm.Text);
    Tfm_0 = Convert.ToDouble(Tfm.Text);
    Tair_0 = Convert.ToDouble(Tair.Text);
    Thair_0 = Convert.ToDouble(Thair.Text);
    Tsair_0 = Convert.ToDouble(Tsair.Text);
    Tcmat_0 = Convert.ToDouble(Tcmat.Text);

    double xi0 = 0.01, xi2 = 0.025;

    double Gs = gmat_0 * ((100 - wfm_0) / (100 - wsm_0));
    double W = Gs - gmat_0;
    double Gair = W / (xi2 - xi0);
    double Vair = (Gair * 3600) / romat_0;
    double Gcair = ((0.25 * (Tcmat_0 - Tfm_0)) / ((0.24 + 0.47 * (10 / 1000)) * (Tsair_0
- Tair_0))) * gmat_0;
    double Vcair = (Gcair * 3600) / romat_0;

    matbal.Text += "Матеріальний баланс виражається рівняннями:" + "\r\n";
    matbal.Text += "1. По абсолютно сухій речовині в висушеному матеріалі" + "\r\n";
    matbal.Text += "Gs = " + Gs + "\r\n";
    matbal.Text += "2. Маса вологи виділяємої з матеріалу" + "\r\n";
    matbal.Text += "W = " + W + "\r\n";
    matbal.Text += "3. Витрати сушильного агенту на сушарку за секунду" + "\r\n";
    matbal.Text += "Gair = " + Gair + "\r\n";
    matbal.Text += "4. Витрати сушильного агенту на сушарку за годину" + "\r\n";
    matbal.Text += "Gair = " + (Gair * 3600) + "\r\n";
    matbal.Text += "5. Об'ємна витрата сушильного агенту при температурі 20 C" +
"\r\n";

    matbal.Text += "Vair = " + Vair + "\r\n";
    matbal.Text += "6. Витрати охолоджувального агенту на охолодження за
секунду" + "\r\n";
    matbal.Text += "Gair = " + Gcair + "\r\n";

```

## Продовження до додатку Д

```

matbal.Text += "7. Витрати охолоджувального агенту на охолодження за годину"
+ "\r\n";
matbal.Text += "Gair = " + (Gcair * 3600) + "\r\n";
matbal.Text += "8. Об'ємна витрата охолоджувального агенту при температурі 20
C" + "\r\n";
matbal.Text += "Vair = " + Vcair + "\r\n";
}

private void button1_Click_1(object sender, EventArgs e)
{
    gmat_0 = Convert.ToDouble(gmat.Text);
    wsm_0 = Convert.ToDouble(wsm.Text);
    wfm_0 = Convert.ToDouble(wfm.Text);
    fisa_0 = Convert.ToDouble(Fisa.Text);
    fifa_0 = Convert.ToDouble(Fifa.Text);
    romat_0 = Convert.ToDouble(romat.Text);
    Tsm_0 = Convert.ToDouble(Tsm.Text);
    Tfm_0 = Convert.ToDouble(Tfm.Text);
    Tair_0 = Convert.ToDouble(Tair.Text);
    Thair_0 = Convert.ToDouble(Thair.Text);
    Tsair_0 = Convert.ToDouble(Tsair.Text);
    Tcmat_0 = Convert.ToDouble(Tcmat.Text);

    double xi0 = 0.01, xi2 = 0.025;

    double Gs = gmat_0 * ((100 - wfm_0)/(100 - wsm_0));
    double W = Gs - gmat_0;
    double Gair = W / (xi2 - xi0);
    double Vair = (Gair * 3600) / romat_0;
    double Gcair = ((0.25 * (Tcmat_0 - Tfm_0)) / ((0.24 + 0.47 *(10/1000))*(Tsair_0 -
Tair_0))) * gmat_0;
    double Vcair = (Gcair * 3600) / romat_0;

    matbal.Text += "Матеріальний баланс виражається рівняннями:" + "\r\n";
    matbal.Text += "1. По абсолютно сухій речовині в висушеному матеріалі" + "\r\n";
    matbal.Text += "Gs = " + Gs + "\r\n";
    matbal.Text += "2. Маса вологи виділяємої з матеріалу" + "\r\n";
    matbal.Text += "W = " + W + "\r\n";
    matbal.Text += "3. Витрати сушильного агенту на сушарку за секунду" + "\r\n";
    matbal.Text += "Gair = " + Gair + "\r\n";
    matbal.Text += "4. Витрати сушильного агенту на сушарку за годину" + "\r\n";
    matbal.Text += "Gair = " + (Gair * 3600) + "\r\n";
    matbal.Text += "5. Об'ємна витрата сушильного агенту при температурі 20 C" +
"\r\n";
    matbal.Text += "Vair = " + Vair + "\r\n";
    matbal.Text += "6. Витрати охолоджувального агенту на охолодження за
секунду" + "\r\n";
    matbal.Text += "Gair = " + Gcair + "\r\n";
    matbal.Text += "7. Витрати охолоджувального агенту на охолодження за годину"
+ "\r\n";
    matbal.Text += "Gair = " + (Gcair * 3600) + "\r\n";

```

## Продовження до додатку Д

```

matbal.Text += "8. Об'ємна витрата охолоджувального агенту при температурі 20
C" + "\r\n";
matbal.Text += "Vair = " + Vcair + "\r\n";
}

double Tha_0, dha_0, roha_0, Thm_0, dhm_0, rohm_0, cha_0, chm_0, lha_0,
lhm_0, whr_0, ks_0, ah_0, Fh_0, ltr_0, shtr_0, dtr_0, din_0, lha_k, lhm_k;

private void розрахунокСушильноїКамериToolStripMenuItem_Click(object sender,
EventArgs e)
{
    Tha_0 = Convert.ToDouble(Tvh.Text);
    dha_0 = Convert.ToDouble(da.Text);
    roha_0 = Convert.ToDouble(roa.Text);
    Thm_0 = Convert.ToDouble(Tm3.Text);
    dhm_0 = Convert.ToDouble(dm.Text);
    rohm_0 = Convert.ToDouble(rom.Text);
    cha_0 = Convert.ToDouble(ca.Text);
    chm_0 = Convert.ToDouble(cm.Text);
    lha_0 = Convert.ToDouble(ga.Text);
    lhm_0 = Convert.ToDouble(gm.Text);
    whr_0 = Convert.ToDouble(wr.Text);
    ks_0 = Convert.ToDouble(Ks.Text);
    ah_0 = Convert.ToDouble(A.Text);
    Fh_0 = Convert.ToDouble(E.Text);
    ltr_0 = Convert.ToDouble(L.Text);
    shtr_0 = Convert.ToDouble(sh.Text);
    dtr_0 = Convert.ToDouble(dtr.Text);
    din_0 = Convert.ToDouble(ds.Text);

    lha_k = lha_0;
    lhm_k = lhm_0;

    double j=0;
    double S = ((3.14 * (dtr_0 * dtr_0)) / 4) * shtr_0;
    double Vdb = S * ltr_0;
    double Ma = lha_0 * 60 * 15;
    double Mm = lhm_0 * 60 * 15;
    double h1 = 1.004 * Tha_0 + 2500 * dha_0 + 1.84 * Tha_0 * dha_0;
    double a1, a2, a3, a4, b1, b2, b3, b4, y1, y2, y3, y4, z1, z2, z3, z4;
    double Akoef = (ah_0 * Fh_0) / (2 * Ma);
    double Bkoef = (ks_0 * Fh_0) / Mm;
    double Ckoef = (ah_0 * Fh_0) / (2 * chm_0 * Mm);
    double Dkoef = lha_0 / Ma;
    for (j=0; j < 900 + din_0; j+= din_0)
    {
        dataGridView2.Rows.Add(Math.Round(j, 3), Math.Round(Tha_0, 4),
Math.Round(dha_0, 4), Math.Round(dhm_0, 3), Math.Round(Thm_0, 4), Math.Round(lha_k, 4),
Math.Round(lhm_k, 4));
        chart2.Series[0].Points.AddXY(j, dha_0);
        chart3.Series[0].Points.AddXY(j, dhm_0);
    }
}

```

## Продовження до додатку Д

```

chart4.Series[0].Points.AddXY(j, Thm_0);

    a1 = din_0 * ((1/(1.004 + 1.84 * dha_0))*(Dkoef*(Tha_0 + 2500 * dha_0 + 1.84 *
Tha_0 * dha_0) - (Dkoef*h1) - (2*Akoef*((90+ Tha_0)/2 - (60 + Thm_0)/2)) + (2500 *
((Mm/Ma)*(Bkoef* dhm_0+Bkoef* whr_0))) - (1.84*((Mm / Ma) * (Bkoef * dhm_0 + Bkoef *
whr_0)))));
    b1 = din_0 * ((Mm/Ma) * (Bkoef * dhm_0 + Bkoef * whr_0));
    y1 = din_0 * ((-Bkoef * dhm_0) + (Bkoef * whr_0));
    z1 = din_0 * (Ckoef * 90 + Ckoef * Tha_0 - Ckoef * 60 - Ckoef * Thm_0);

    a2 = din_0 * ((1 / (1.004 + 1.84 * (dha_0 + b1/2))) * (Dkoef * ((Tha_0+a1/2) + 2500
* (dha_0+b1/2) + 1.84 * (Tha_0 * a1/2) * (dha_0 + b1/2)) - (Dkoef * h1) - (2 * Akoef * ((90 + (Tha_0
+ a1/2)) / 2 - (60 + (Thm_0+z1/2)) / 2)) + (2500 * ((Mm / Ma) * (Bkoef * (dhm_0+y1/2) + Bkoef *
whr_0))) - (1.84 * ((Mm / Ma) * (Bkoef * (dhm_0+y1/2) + Bkoef * whr_0)))));
    b2 = din_0 * ((Mm / Ma) * (Bkoef * (dhm_0+y1/2) + Bkoef * whr_0));
    y2 = din_0 * (-Bkoef * (dhm_0+y1/2) + Bkoef * whr_0);
    z2 = din_0 * (Ckoef * 90 + Ckoef * (Tha_0 +a1/2) - Ckoef * 60 - Ckoef *
(Thm_0+z1/2));

    a3 = din_0 * ((1 / (1.004 + 1.84 * (dha_0 + b2 / 2))) * (Dkoef * ((Tha_0 + a2 / 2) +
2500 * (dha_0 + b2 / 2) + 1.84 * (Tha_0 * a2 / 2) * (dha_0 + b2 / 2)) - (Dkoef * h1) - (2 * Akoef *
((90 + (Tha_0 + a2 / 2)) / 2 - (60 + (Thm_0 + z2 / 2)) / 2)) + (2500 * ((Mm / Ma) * (Bkoef * (dhm_0
+ y2 / 2) + Bkoef * whr_0))) - (1.84 * ((Mm / Ma) * (Bkoef * (dhm_0 + y2 / 2) + Bkoef * whr_0)))));
    b3 = din_0 * ((Mm / Ma) * (Bkoef * (dhm_0 + y2 / 2) + Bkoef * whr_0));
    y3 = din_0 * (-Bkoef * (dhm_0 + y2 / 2) + Bkoef * whr_0);
    z3 = din_0 * (Ckoef * 90 + Ckoef * (Tha_0 + a2 / 2) - Ckoef * 60 - Ckoef * (Thm_0
+ z2 / 2));

    a4 = din_0 * ((1 / (1.004 + 1.84 * (dha_0 + b3))) * (Dkoef * ((Tha_0 + a3) + 2500
* (dha_0 + b3) + 1.84 * (Tha_0 * a3) * (dha_0 + b3)) - Dkoef * h1 - 2 * Akoef * ((90 + (Tha_0 +
a3)) / 2 - (60 + (Thm_0 + z3)) / 2) + 2500 * ((Mm / Ma) * (Bkoef * (dhm_0 + y3) + Bkoef * whr_0))
- 1.84 * ((Mm / Ma) * (Bkoef * (dhm_0 + y3) + Bkoef * whr_0)))));
    b4 = din_0 * ((Mm / Ma) * (Bkoef * (dhm_0 + y3) + Bkoef * whr_0));
    y4 = din_0 * (-Bkoef * (dhm_0 + y3) + Bkoef * whr_0);
    z4 = din_0 * (Ckoef * 90 + Ckoef * (Tha_0 + a3) - Ckoef * 60 - Ckoef * (Thm_0 +
z3));

    Tha_0 += (0.166) * (a1 + 2 * a2 + 2 * a3 + a4);
    dha_0 += (0.166) * (b1 + 2 * b2 + 2 * b3 + b4);
    dhm_0 += (0.166) * (y1 + 2 * y2 + 2 * y3 + y4);
    Thm_0 += (0.166) * (z1 + 2 * z2 + 2 * z3 + z4);

    lha_k += lha_0;
    lhm_k += lhm_0;
}
}

double v1_0, v2_0, c1_0, c2_0, F_0, k_0, dl_0, t1, Tm, cold_koef, Vm_0, Va_0, dct_0;

/*Calculate K*/

```

```

private void button_k_Click(object sender, EventArgs e)
{
    v2_0 = Convert.ToDouble(v2.Text);
    dct_0 = Convert.ToDouble(d55.Text);
    cold_koef = (3.25 * (Math.Pow((0.972 * v2_0), 0.8))) / (Math.Pow(dct_0, 0.2));
    k.Text = Convert.ToString(cold_koef);
}
private void cold_box_Click(object sender, EventArgs e)
{
    v1_0 = Convert.ToDouble(v1.Text);
    v2_0 = Convert.ToDouble(v2.Text);
    c1_0 = Convert.ToDouble(c1.Text);
    c2_0 = Convert.ToDouble(c2.Text);
    F_0 = Convert.ToDouble(F.Text);
    k_0 = Convert.ToDouble(k.Text);
    dl_0 = Convert.ToDouble(dl.Text);
    t1 = Convert.ToDouble(Tvh44.Text);
    Tm = Convert.ToDouble(Tm44.Text);
    Vm_0 = Convert.ToDouble(Vm.Text);
    Va_0 = Convert.ToDouble(Va.Text);
    double i;
    double k1, k2, k3, k4, m1, m2, m3, m4;
    for (i = 0; i < 900+dl_0; i += dl_0)
    {
        dataGridView1.Rows.Add(Math.Round(i, 3), Math.Round(Tm, 4), Math.Round(t1,
4));
        chart1.Series[0].Points.AddXY(i, Tm);
        chart1.Series[1].Points.AddXY(i, t1);

        k1 = dl_0 * ((v1_0 * c1_0 * (60.3 - Tm) - F_0*k_0*(Tm - t1)) / (c1_0 * Vm_0));
        k2 = dl_0 * ((v1_0 * c1_0 * (60.3 - (Tm + (k1) / 2)) - F_0 * k_0 * ((Tm + (k1) / 2)
- t1)) / (c1_0 * Vm_0));
        k3 = dl_0 * ((v1_0 * c1_0 * (60.3 - (Tm + (k2) / 2)) - F_0 * k_0 * ((Tm + (k2) / 2)
- t1)) / (c1_0 * Vm_0));
        k4 = dl_0 * ((v1_0 * c1_0 * (60.3 - (Tm + (k3)))) - F_0 * k_0 * ((Tm + (k3)) - t1)) /
(c1_0 * Vm_0));

        m1 = dl_0 * ((v2_0 * c2_0 * (25 - t1) - F_0 * k_0 * (Tm - t1)) / (c2_0 * Va_0));
        m2 = dl_0 * ((v2_0 * c2_0 * (25 - t1 + m1 / 2) - F_0 * k_0 * (Tm - t1 + m1 / 2)) /
(c2_0 * Va_0));
        m3 = dl_0 * ((v2_0 * c2_0 * (25 - t1 + m2 / 2) - F_0 * k_0 * (Tm - t1 + m2 / 2)) /
(c2_0 * Va_0));
        m4 = dl_0 * ((v2_0 * c2_0 * (25 - t1 + m3) - F_0 * k_0 * (Tm - t1 + m3)) / (c2_0 *
Va_0));

        Tm += (0.166) * (k1 + 2 * k2 + 2 * k3 + k4);
        t1 += (0.166) * (m1 + 2 * m2 + 2 * m3 + m4);
    }
}
}
}

```

## Документ MathCad. Налаштування ПІ регулятора

## ВИЗНАЧЕННЯ НАЛАШТУВАНЬ ПІ РЕГУЛЯТОРА

Вводимо уявну одиницю:  $j \equiv \sqrt{-1}$

Задамо масив індексів:  $i := 1..1000$

Задамо масив значень  $\omega$  і  $p$ :

$$\omega_i := 0.01 \cdot i \quad p_i := \omega_i \cdot j \quad \text{ORIGIN} \equiv 1 \quad n := 1..4$$

## Передавальна функція об'єкта

Введемо відомі параметри передавальної об'єкта

$$k_1 := 7 \quad T_1 := 0.01 \quad T_2 := 26$$

Введемо власне функцію об'єкта у вигляді масиву

$$W_{ob_i} := \frac{k_1}{(T_1 \cdot p_i + 1) \cdot (T_2 \cdot p_i + 1)}$$

## Передавальна функція ПІ регулятора

Задаємо початкове значення коефіцієнта підсилення

$$K_{p_n} := 1 \quad T_{i_d} := 0.5$$

Вводимо передавальну функцію ПІД регулятора

$$W_{reg_i} := K_{p_1} \cdot \left( 1 + \frac{1}{T_1 \cdot p_i} \right)$$

## Побудова загальної АФХ об'єкта і регулятора

Знайдемо загальну передавальну функцію об'єкта і регулятора при розімкнутій системі

$$W_{i_d} := W_{ob_i} \cdot W_{reg_i}$$

Побудуємо АФХ отриманої функції

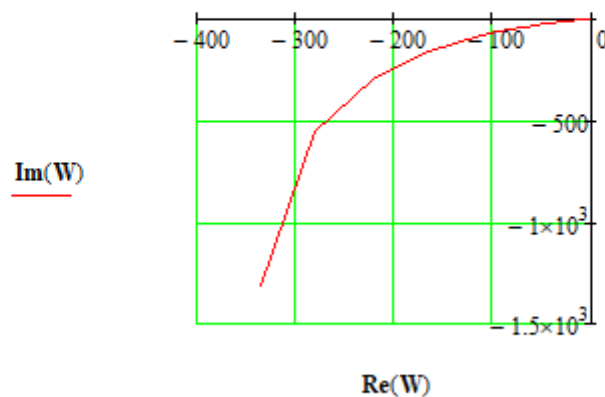


Рис.Е.1. АФХ розімкненої системи з ПІ-регулятором

**Побудова променя і М-кола**

Задаємо значення М  $M := 1.4$

Знаходимо кутовий коефіцієнт променя

$$k1 := \tan\left(\arcsin\left(\frac{1}{M}\right)\right)$$

Знаходимо масив індексів для частини променя

$$i1 := 1..400$$

Знаходимо масиви координат для побудови променя

$$x1_{i1} := -i1 + 1 \quad y1_{i1} := k1 \cdot x1_{i1}$$

Задаємо масив індексів М-кола

$$ic := 1.. \frac{2 \cdot 3.14}{0.01}$$

Задаємо приблизне значення  $L1 := 415$

Вводимо функцію М-кола

$$\beta_{ic} := 0.01 \cdot ic \quad Mcir_{ic} := \left(\cos(\beta_{ic}) + j \cdot \sin(\beta_{ic})\right) \cdot \frac{L1}{M} - L1$$

Будуємо описаним вище способом графік

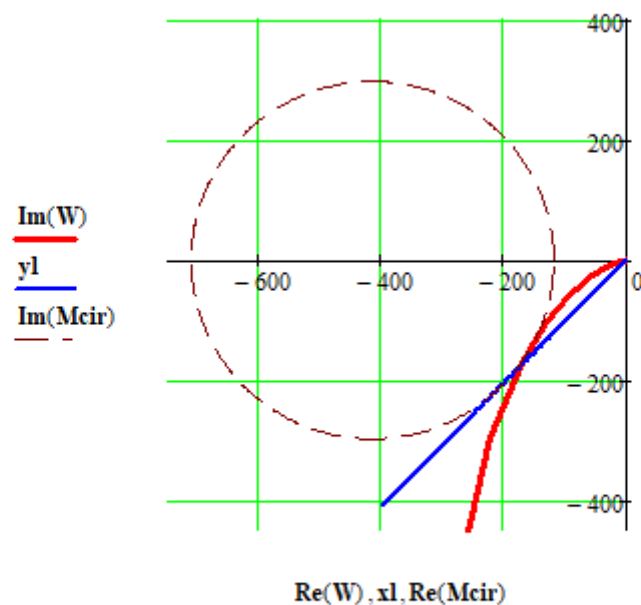


Рис.Е 2 АФХ системи з побудованим променем і М-колом

Визначення оптимального значення коефіцієнта пропорційності

Змінюючи значення введеного вище L потрібно домогтися дотику М кола до АФХ

Обчислюємо  $K_p$

$$r := \frac{L1}{M} \quad r = 296.429 \quad Kp_1 := \frac{1}{r} \cdot \frac{M}{M^2 - 1} = 0.005$$

Аналогічно

$$Kp_2 := 1 \quad T_2 := 0.8$$

$$Wreg_i := Kp_2 \cdot \left( 1 + \frac{1}{T_2 \cdot p_i} \right)$$

$$W_i := Wob_i \cdot Wreg_i$$

$$L1 := 245$$

$$Mcir_{ic} := (\cos(\beta_{ic}) + j \cdot \sin(\beta_{ic})) \cdot \frac{L1}{M} - L1$$

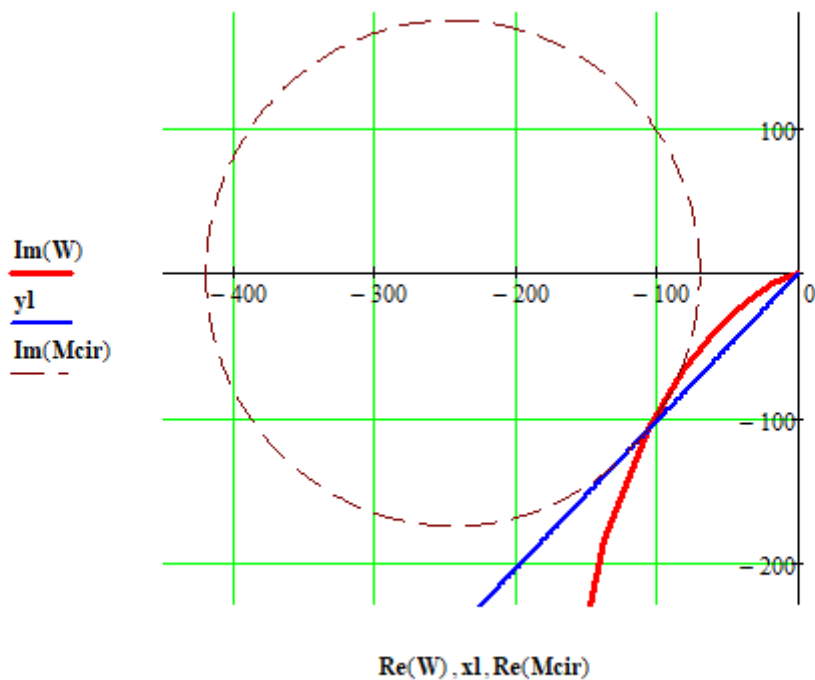


Рис.Е 3 АФХ системи з побудованим променем і  $M$ -колом  $T=0.8$

Обчислюємо  $K_p$

$$r := \frac{L1}{M} \quad r = 175 \quad Kp_2 := \frac{1}{r} \cdot \frac{M}{M^2 - 1} = 0.0083$$

$$Kp_3 := 1 \quad T_3 := 0.9$$

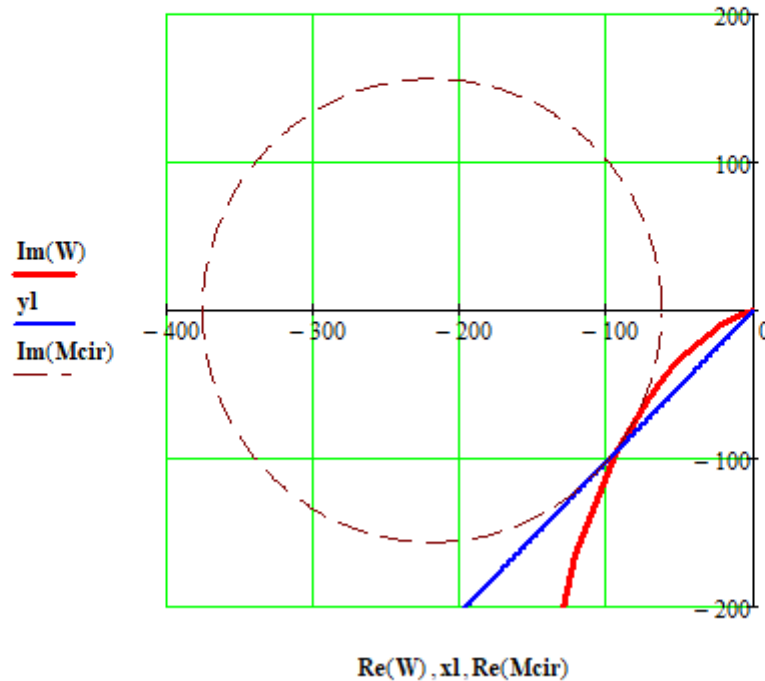
$$Wreg_i := Kp_3 \cdot \left( 1 + \frac{1}{T_3 \cdot p_i} \right)$$

Продовження до додатку Е

$$W_i := W_{ob_i} \cdot W_{reg_i}$$

$$L1 := 219$$

$$M_{cir_{ic}} := \left( \cos(\beta_{ic}) + j \cdot \sin(\beta_{ic}) \right) \cdot \frac{L1}{M} - L1$$

Рис.Е 4 АФХ системи з побудованим променем і М-колом  $T=0.9$ Обчислюємо  $K_p$ 

$$r := \frac{L1}{M} \quad r = 156.429 \quad K_{p3} := \frac{1}{r} \cdot \frac{M}{M^2 - 1} = 0.0093$$

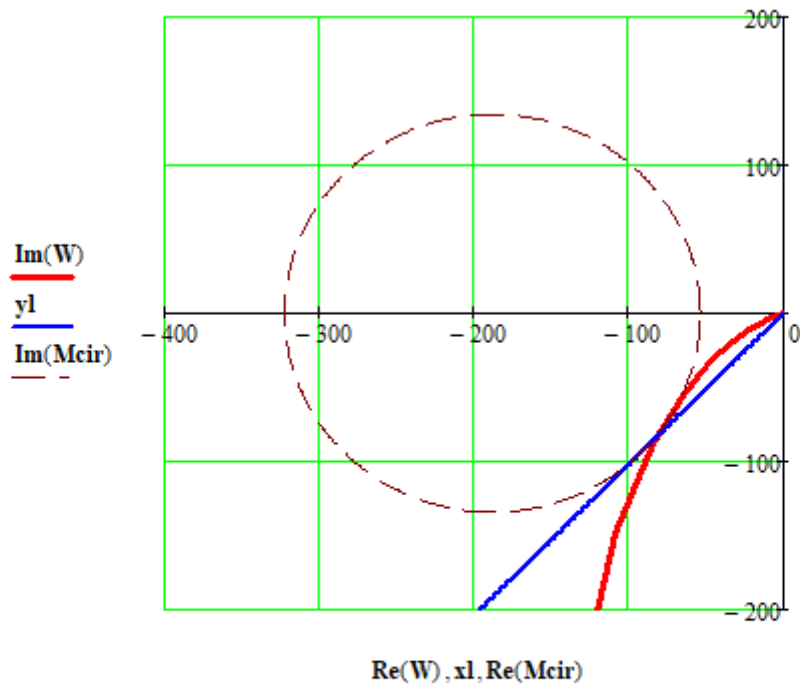
$$K_{p4} := 1 \quad T_4 := 1$$

$$W_{reg_i} := K_{p4} \cdot \left( 1 + \frac{1}{T_4 \cdot p_i} \right)$$

$$W_i := W_{ob_i} \cdot W_{reg_i}$$

$$L1 := 188$$

$$M_{cir_{ic}} := \left( \cos(\beta_{ic}) + j \cdot \sin(\beta_{ic}) \right) \cdot \frac{L1}{M} - L1$$

Рис.Е 5 АФХ системи з побудованим променем і М-колом  $T=1$ 

$$r := \frac{L1}{M} \quad r = 134.286 \quad Kp_4 := \frac{1}{r} \cdot \frac{M}{M^2 - 1} = 0.011$$

## Документ MathCad. Перехідна характеристика замкненої системи

Знаходження оптимальних параметрів регулятора

Маємо таблиці значень  $T_i$  і  $K_p$

$$T_i := \begin{pmatrix} 0.5 \\ 0.8 \\ 0.9 \\ 1 \end{pmatrix} \quad K_p = \begin{pmatrix} 4.92 \times 10^{-3} \\ 8.333 \times 10^{-3} \\ 9.323 \times 10^{-3} \\ 0.011 \end{pmatrix}$$

$\text{coef} := \text{cspline}(T_i, K_p)$

$\underline{g}(x) := \text{interp}(\text{coef}, T_i, K_p, x) \quad T_{i\_opt} := 1 \quad K_{p\_opt} := 0.011$

$x := 0, 0.1 \dots 1.8$

$\underline{\text{line}}(x) := \frac{K_{p\_opt}}{T_{i\_opt}} \cdot x$

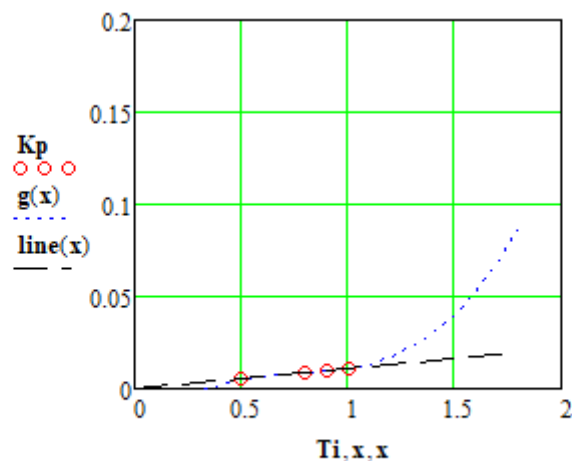


Рис.Ж 1 Границя області запасу стійкості

**Побудова перехідної характеристики замкненої системи III регулятором:**

Оголошуємо  $p$ , як символну змінну:

$p := p$

Введемо передавальну функцію об'єкта і регулятора у символній формі:

$$W_{ob} := \frac{k_1}{(T_1 \cdot p + 1) \cdot (T_2 \cdot p + 1)} \quad W_{reg\_opt} := K_{p\_opt} \cdot \left( \frac{1}{T_{i\_opt} \cdot p} + 1 \right)$$

Отримаємо передавальну функцію розімкненої системи:

$$W_{pr} := W_{reg\_opt} \cdot W_{ob}$$

Отримаємо передавальну функцію замкненої системи:

$$W_z := \frac{W_{pr}}{W_{pr} + 1}$$

Отримаємо перехідну характеристику системи застосувавши зворотнє перетворення по Лапласу, попередь помноживши на  $1/p$ ):

Продовження до додатку Ж

$$\Phi(t) = \mathbf{Wz} \cdot \frac{1}{p} \left| \begin{array}{l} \text{invlaplace, p, t} \\ \text{float, 2} \end{array} \right. \rightarrow 0.000029 \cdot e^{-100.0 \cdot t} + 0.00061 \cdot e^{-0.038 \cdot t} + -0.0000011 \cdot t \cdot e^{-100.0 \cdot t}$$

$$(0.5 + 0.18i) \cdot \cos(0.05 \cdot t) \cdot e^{-0.021 \cdot t} - (0.18 - 0.5i) \cdot \sin(0.05 \cdot t) \cdot e^{-0.021 \cdot t} - (0.5 - 0.18i) \cdot \cos(0.05 \cdot t) \cdot e^{-0.021 \cdot t}$$

$$t = 0, 0.1 .. 600$$

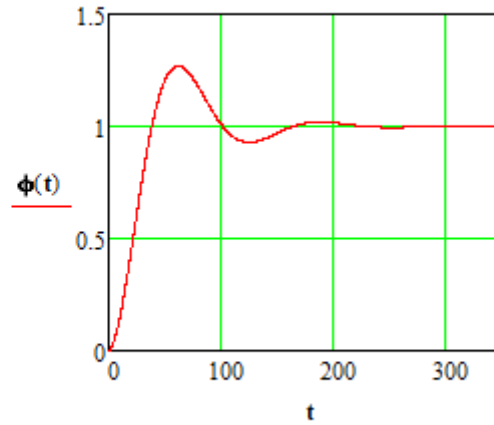


Рис.Ж 2 Границя області запасу стійкості