

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ  
В.о. завідувача кафедри  
автоматики та робототехнічних систем  
ім. акад. І.І. Мартиненка  
(назва кафедри)

к.т.н., доцент \_\_\_\_\_ О.О. Опришко  
(підпис) (ПІБ)

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

на тему "РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ  
ВОЛОГІСТЮ ПРИ СУШІННІ ВЕРМИКУЛІТУ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ  
КОМПЛЕКСУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ОВЕН"

Спеціальність: 151 - "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології"

Гарант освітньої програми

Д.Т.Н., проф. \_\_\_\_\_  
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис)

Заєць Н.А.  
(П.І.Б.)

Керівник кваліфікаційної бакалаврської роботи

К.Т.Н., доц. \_\_\_\_\_  
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис)

Дудник А.О.  
(П.І.Б.)

Виконав

\_\_\_\_\_ (підпис)

Москаленко Б.Ю.  
(П.І.Б.)

КИЇВ – 2025

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ  
ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ  
ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри  
автоматики та робототехнічних систем  
ім. акад. І.І. Мартиненка  
(назва кафедри)

К.Т.Н., доц. \_\_\_\_\_ О.О. Опришко  
(підпис) (ПБ)  
" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання кваліфікаційної бакалаврської роботи студенту

Москаленку Богдану Юрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність: 151 - "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології"

1. Тема кваліфікаційної бакалаврської роботи: "Розробка системи автоматичного керування вологістю при сушінні вермикуліту із використанням комплексу технічних засобів ОВЕН",

затверджена наказом ректора НУБіП України від "18" 11 2024 р. № 2056"С"

2. Термін подання завершеної роботи на кафедру "30" травня 2025 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної бакалаврської роботи:

3.1. Завдання кафедри на виконання кваліфікаційної бакалаврської роботи.

3.2. Нормативні документи по проектуванню об'єктів автоматизації.

3.3. Наукова література з тематики кваліфікаційної бакалаврської роботи.

4. Перелік питань, які необхідно розробити:

4.1. Класифікація технологічних процесів сушіння та зберігання вермикуліту.

4.2. Дослідження об'єкта автоматизації.

4.3. Вибір регулятора та обґрунтування параметрів його налаштувань.

4.4. Розробка цифрової системи керування.

4.5. Схеми системи автоматизації.

4.6. Техніко-економічне обґрунтування.

5. Перелік графічних документів:

5.1. Функціональна схема автоматизації системи керування шахтною сушаркою для вермикуліту.

5.2. Система керування шахтною сушаркою для вермикуліту. Схема електрична принципова.

5.3. Система керування шахтною сушаркою для вермикуліту. Схема електрична з'єднань.

5.4. Система керування шахтною сушаркою для вермикуліту. Схема електрична підключень.

5.5. Система керування шахтною сушаркою для вермикуліту. Зовнішній вигляд щита керування.

Дата видачі завдання "19" листопада 2024 року

Керівник  
кваліфікаційної  
бакалаврської роботи

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Дудник А.О.  
(П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Москаленко Б.Ю.  
(П.І.Б.)

## Зміст

ВСТУП .....	<b>ОШИБКА! ЗАКЛАДКА НЕ ОПРЕДЕЛЕНА.</b>
1. КЛАСИФІКАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ СУШІННЯ ТА ЗБЕРІГАННЯ ВЕРМИКУЛІТУ	<b>ОШИБКА! ЗАКЛАДКА НЕ ОПРЕДЕЛЕНА.</b>
1.1. Основні положення управління процесами зберігання вермикуліту .....	7
1.2. Способи та технологічні установки для сушіння вермикуліту .....	9
1.3. Принцип роботи шахтних сушарок вермикуліту .....	13
1.4. Функціональна схема автоматизації системи керування шахтною сушаркою вермикуліту .....	17
2. ДОСЛІДЖЕННЯ ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ .....	20
2.1. Розробка математичної моделі об'єкта автоматизації .....	20
2.2. Розробка та дослідження імітаційної моделі об'єкта автоматизації із використанням математичних пакетів MATLAB та MathCad .....	24
2.3. Визначення передатної функції шахтної сушарки вермикуліту для каналу керування температурою вермикуліту .....	28
3. ВИБІР РЕГУЛЯТОРА ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЙОГО НАЛАШТУВАНЬ .....	<b>ОШИБКА! ЗАКЛАДКА НЕ ОПРЕДЕЛЕНА.</b>
3.1. Вибір алгоритму керування та визначення параметрів настройки регулятора .....	31
3.2. Реалізація алгоритму керування .....	33
3.2.1. Вибір програмно-логічного контролера та модулів розширення підключення датчиків температури та вологості .....	34
3.2.2. Вибір датчиків температури вермикуліту та агенту сушіння та визначення їх передатних функцій .....	36
3.2.3. Вибір датчиків вологості вермикуліту .....	39
3.2.4. Вибір датчиків рівня вермикуліту .....	41
3.2.5. Визначення передатної функції електродвигуна приводу вивантажувального шнеку як виконавчого механізму САК температурою вермикуліту .....	43
3.2.6. Вибір частотного перетворювача	<b>Ошибки! Закладка не определена.</b>

4. РОЗРОБКА ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....	50
5. СХЕМИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ. <b>ПОМИЛКА! ЗАКЛАДКА НЕ ОПРЕДЕЛЕНА</b>	
5.1 Розробка схеми електричної принципової системи автоматичного керування шахтною сушаркою вермикуліту.....	58
5.2. Вибір апаратури захисту та керування .....	60
5.2.1. Вибір автоматичних вимикачів .....	62
5.2.2. Вибір електромагнітних пускачів.....	65
5.2.3. Вибір проміжних реле .....	67
5.3. Вибір проводів та кабелів.....	68
5.4. Розробка електричних схем з'єднань та підключень системи керування шахтною сушаркою вермикуліту.....	71
5.5. Вибір щита керування.....	72
6. Техніко-економічне обґрунтування. ....	74
ВИСНОВКИ.....	78
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ <b>ПОМИЛКА! ЗАКЛАДКА НЕ ОПРЕДЕЛЕНА</b>	
ДОДАТКИ..... <b>ПОМИЛКА! ЗАКЛАДКА НЕ ОПРЕДЕЛЕНА</b> .0	

## ВСТУП

*Актуальність теми.* В умовах сучасного розвитку будівельної, сільськогосподарської та хімічної промисловості зростає потреба у використанні екологічно чистих, негорючих, тепло- та звукоізолюючих матеріалів. Одним із таких універсальних природних матеріалів є вермикуліт — мінерал групи гідрослюд, який після термічної обробки набуває унікальних властивостей: низьку теплопровідність, високу пористість, вогнестійкість, біологічну інертність та низьку щільність.

Серед усіх етапів обробки вермикуліту сушіння є критично важливим технологічним процесом. Якість сушіння прямо впливає на ефективність подальшого спучування мінералу, його фізико-механічні характеристики та енергетичні витрати при виробництві. Недостатньо просушений вермикуліт може спричинити неоднорідність структури при термічній експансії, зниження теплоізоляційних властивостей та перевитрату енергії у печах.

У контексті сучасних вимог до енергоефективності виробництва та оптимізації витрат особливу увагу привертають технології попереднього сушіння вермикуліту із застосуванням автоматизованих, економічно вигідних сушильних установок. Вибір та удосконалення таких установок (наприклад, шахтних або барабанних сушарок) дає можливість підвищити продуктивність лінії, покращити якість кінцевого продукту і зменшити вплив на довкілля.

Крім того, актуальність теми зумовлена зростанням експорту вогнестійких і теплоізоляційних матеріалів, де вермикуліт займає чільне місце. Потреба у стабільному та якісному постачанні розширеного вермикуліту обумовлює необхідність оптимізації всіх технологічних процесів, зокрема сушіння як підготовчої стадії.

*Об'єктом дослідження* є процес сушіння вермикуліту у шахтній прямоточній сушарці.

*Предметом досліджень* є залежності енергозатрат на процес сушіння від режиму і параметрів роботи сушарки вермикуліту.

*Мета і задачі досліджень.* Мета роботи полягає розробити або удосконалити технологічний процес сушіння вермикуліту з метою підвищення енергоефективності, забезпечення стабільної якості сировини для подальшого спучування та зниження виробничих витрат.

Для досягнення цієї мети сформульовані такі задачі:

- дослідження особливостей сучасних систем автоматизації процесів керування температурним режимом сушіння вермикуліту у шахтних сушарках;

- розробка функціональної схеми системи керування шахтною сушаркою і алгоритму її роботи;

- розробка і дослідження імітаційної моделі об'єкта автоматизації із використанням програмного пакету MatLAB;

- обґрунтування вибору алгоритму керування, комплексу технічних засобів автоматизації, визначення показників якості роботи системи керування;

- розробка схем системи автоматизації.

*Методи досліджень.* У даній роботі ґрунтуються на основних положеннях теорії сушіння, теплопередачі, масообміну та математичного моделювання з використанням комп'ютерних технологій. Це дозволяє комплексно аналізувати процеси, що відбуваються під час сушіння вермикуліту, та забезпечити точність інженерних розрахунків і проектних рішень.

# 1 КЛАСИФІКАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ СУШІННЯ ТА ЗБЕРІГАННЯ ВЕРМИКУЛІТУ

## 1.1 Основні положення управління процесами зберігання вермикуліту

Основні положення управління процесами зберігання вермикуліту охоплюють заходи, що забезпечують збереження якості матеріалу, безпеку для персоналу, а також ефективну логістику. Оскільки вермикуліт — це легкий, сипкий, інертний матеріал [4,5,6] (особливо в розширеному вигляді), його зберігання має кілька специфічних вимог.

### 1. Умови зберігання

#### Вологість і температура

- Зберігати у сухих, добре вентильованих приміщеннях.
- Не допускати зволоження — особливо для розширеного вермикуліту, бо волога може погіршити теплоізоляційні властивості та спричинити злипання гранул.
- Температурні коливання не критичні, але бажано уникати потрапляння води при конденсації.

#### Захист від забруднення

- Вермикуліт має пористу структуру, тому легко поглинає запахи та пил — важливо зберігати його окремо від речовин із сильними запахами (пестициди, нафтопродукти).
- Використовуються щільно закриті мішки, біг-беги або контейнери.

### 2. Способи зберігання

#### Фасований вермикуліт

- Зберігається в паперових, поліетиленових або поліпропіленових мішках (10–50 кг).
- Мішки ставлять на піддони, укладають штабелем не вище 2–3 м, щоб уникнути зминання нижніх мішків.

#### Насипний вермикуліт

- Для великих обсягів — силоси, бункери або закриті склади з бетонною підлогою.
- Обов'язкова наявність герметичних штор або кришок, щоб уникнути потрапляння пилу, вологи та сторонніх речовин.

### 3. Заходи безпеки

- Вермикуліт не є токсичним, але при роботі з ним (особливо насипним) утворюється дрібнодисперсний пил.
- Необхідно використовувати:
  - Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) — маски/респіратори, окуляри.

- Пилоуловлююче обладнання — при завантаженні чи фасуванні.
- У разі використання вогнестійких сумішей з добавками (наприклад, цементу чи гіпсу) — враховують вимоги до зберігання сумішей.

#### 4. Облік і контроль

- Застосовується система маркування та інвентаризації — особливо для партій різної фракції (дрібна, середня, груба).
- Ведеться облік:
  - дати надходження,
  - умов зберігання,
  - термінів використання (якщо є додаткові домішки чи вологість).
- У великих складських комплексах — автоматизовані системи управління запасами (WMS).

#### 5. Транспортування і переміщення

- Перевозити у герметичних мішках або біг-бегах, у накритих вантажівках або контейнерах.
- При завантаженні/вивантаженні — уникати розсипання та пошкодження упаковки.
- Внутрішнє переміщення — на піддонах або навантажувачами, з урахуванням легкості та сипучості вантажу.

## 1.2 Способи та технологічні установки для сушіння вермикуліту

Сушіння вермикуліту — це важливий підготовчий етап у технологічному процесі його переробки, що забезпечує зниження вологості сировини до рівня 1–2% перед спучуванням. Якість і ефективність сушіння безпосередньо впливають на кінцеві властивості розширеного вермикуліту. Існують різні способи сушіння, кожен з яких має свої переваги і обмеження залежно від властивостей сировини, обсягів виробництва та енергетичних ресурсів.

Сушарки класифікуються за різними ознаками залежно від принципу дії, способу підведення теплоти, типу теплогенератора, режиму роботи тощо. Основні класифікаційні ознаки:

За способом підведення теплоти:

- Конвекційні – теплота передається шляхом омивання матеріалу гарячим повітрям або димовими газами.

- Кондуктивні (контактні) – теплота передається безпосередньо через нагріті поверхні.

- Сублімаційні – волога видаляється у замороженому стані під вакуумом.

- Радіаційні – використовується інфрачервоне випромінювання.

- Високочастотні – дія електромагнітного поля високої частоти.

За температурним режимом:

- Низькотемпературні – до 60 °С

- Високотемпературні – понад 100 °С

За режимом роботи:

- Неперервної дії – матеріал постійно подається та вивантажується.

- Періодичної дії – сушіння відбувається партіями.

За конструктивними особливостями шару матеріалу:

- Із нерухомим щільним шаром

- Із рухомим або псевдозрідженим шаром

- Із зваженим шаром (наприклад, у вихрових сушарках)

За принципом дії:

- Прямоточні – теплоносій і матеріал рухаються в одному напрямку.

- Протиточні (рециркуляційні) – частина висушеного матеріалу повертається до сушарки.

За способом нагріву агента сушіння:

- Прямий нагрів – теплоносій утворюється шляхом змішування повітря з топковими газами.

- Непрямий нагрів – використовується теплообмінник, що забезпечує подачу чистого повітря.

Технологічні установки для сушіння сипких матеріалів[8,18]

З урахуванням класифікації, найбільш поширеними установками для сушіння сипких мінералів, таких як вермикуліт, є:

- Шахтні сушарки

- Барабанні сушарки

- Камерні сушарки

- Тунельні сушарки

- Карусельні та модульні установки

- ІЧ- та ВЧ-сушарки

Актуальність вибору шахтних сушарок

Шахтні сушарки неперервної дії є найбільш доцільними для сушіння вермикуліту через такі переваги:

- рівномірне сушіння;

- можливість обробки матеріалу з різною початковою вологістю (при рециркуляції);

- економічність та надійність;
- простота в обслуговуванні;
- придатність для великих обсягів.

У нашому випадку, з огляду на технологічні особливості вермикуліту як сипкого мінералу, що потребує рівномірного та контрольованого сушіння перед спучуванням, було обрано шахтну сушарку. Такий тип сушильного обладнання забезпечує ефективний тепломасообмін, енергоекономічність та стабільність параметрів сушіння, що є критично важливими для збереження фізико-хімічних властивостей вермикуліту.

Переваги шахтних сушарок:

- рівномірність тепло масообміну та сушіння;
- висока продуктивність при відносно простій конструкції;
- можливість рециркуляції теплоносія, що знижує енерговитрати;
- універсальність: підходять для матеріалів з різною вологістю та фракцією;
- низькі експлуатаційні витрати та стабільність роботи.

Застосування для вермикуліту

У процесі підготовки вермикуліту до спучування вкрай важливо забезпечити контрольоване зниження вологості до 1–2% без перегрівання чи передчасної деформації структури [7]. Завдяки вертикальній орієнтації та м'якому сушильному режиму, шахтна сушарка:

- мінімізує пилоутворення;
- забезпечує рівномірність термообробки;
- дозволяє ефективно обробляти матеріал з різною початковою вологістю.

Шахтна сушарка є оптимальним варіантом для сушіння вермикуліту перед спучуванням, оскільки поєднує ефективність, економічність та надійність. У рамках цієї дипломної роботи дана установка обрана як базовий об'єкт дослідження процесу сушіння сипких матеріалів.

### 1.3 Принцип роботи шахтних сушарок вермикуліту

Однією з найпоширеніших технологій попередньої підготовки вермикуліту перед його термічним розширенням є сушіння у шахтних сушарках з гравітаційним рухом матеріалу. У таких сушарках вермикуліт рухається зверху вниз у вигляді щільного шару, проходячи зони обігріву, що утворені системою коробів підведення та відведення теплоносія, які розташовані у шаховому порядку. Така організація забезпечує рівномірне та ефективне продування шару матеріалу теплоносієм, який подається з одного боку шахти, проходить через сипкий шар вермикуліту та виводиться через короба з протилежного боку.

Агент сушіння (тепле повітря) виконує функцію як теплопереносника, так і вологовідвідника. У процесі сушіння при температурі близько 100 °С з вермикуліту видаляється фізично зв'язана волога, що є важливим етапом підготовки до подальшого випалу. При недостатньому прогріві сировина зберігає надмірну вологість, що негативно впливає на ефективність спучування, а також може призвести до нерівномірного розширення або розтріскування частинок.

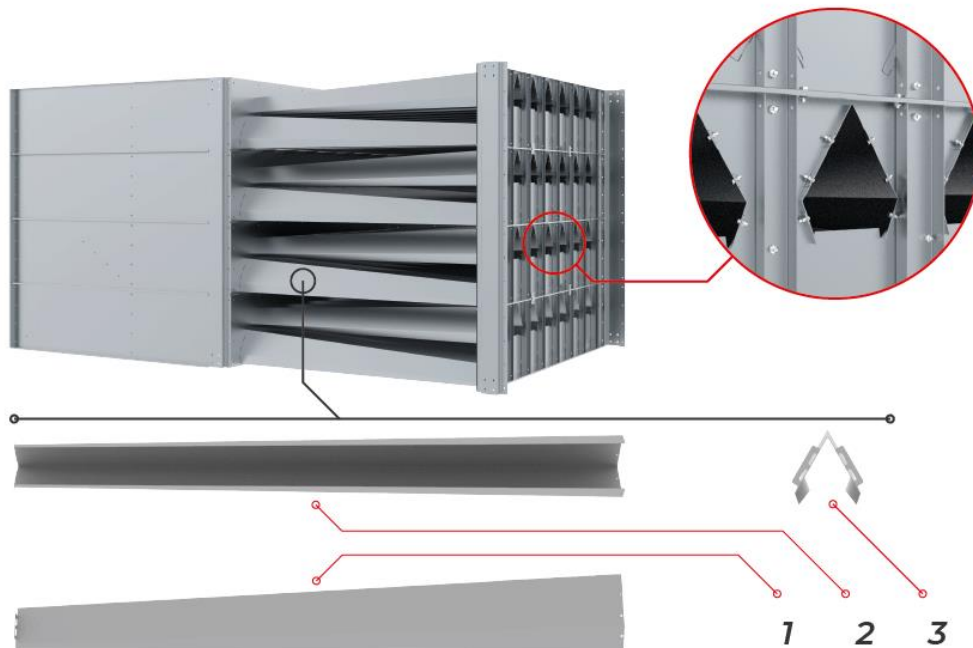


Рис. 1.2. Конструкція сушильних коробів:

1 – вигляд з боку; 2 – вигляд знизу; 3 – фронтальний вигляд

Короб представляє собою металевий канал з відкритою нижньою стороною, через яку агент сушіння входить у шар вермикуліту або виходить з нього. Під коробом сипкий матеріал розташовується під кутом природного відкосу, що забезпечує рівномірний прохід повітря. Один торець короба відкритий, інший – заглушений. У коробах підведення відкритий вхідний бік для подачі агента сушіння, а вихід заглушений. У коробах відведення – навпаки. Для виготовлення коробів використовується листована оцинкована або жаростійка сталь товщиною 1,5...2 мм. Шахтні сушарки прямого типу застосовуються для попереднього сушіння природного вермикуліту перед його випалюванням (експандуванням). Такий тип сушарок працює в режимі

неперервної дії, що дозволяє забезпечити рівномірний, контрольований процес видалення вологи з мінералу при температурі близько 100 °С.

Верхній бункер сушарки заповнюється сирим вермикулітом, після чого матеріал поступово опускається вниз у шахті під дією сили тяжіння, утворюючи щільний сипкий шар. Швидкість руху вермикуліту регулюється випускним механізмом, а його рівень контролюється за допомогою датчиків верхнього та нижнього рівня.

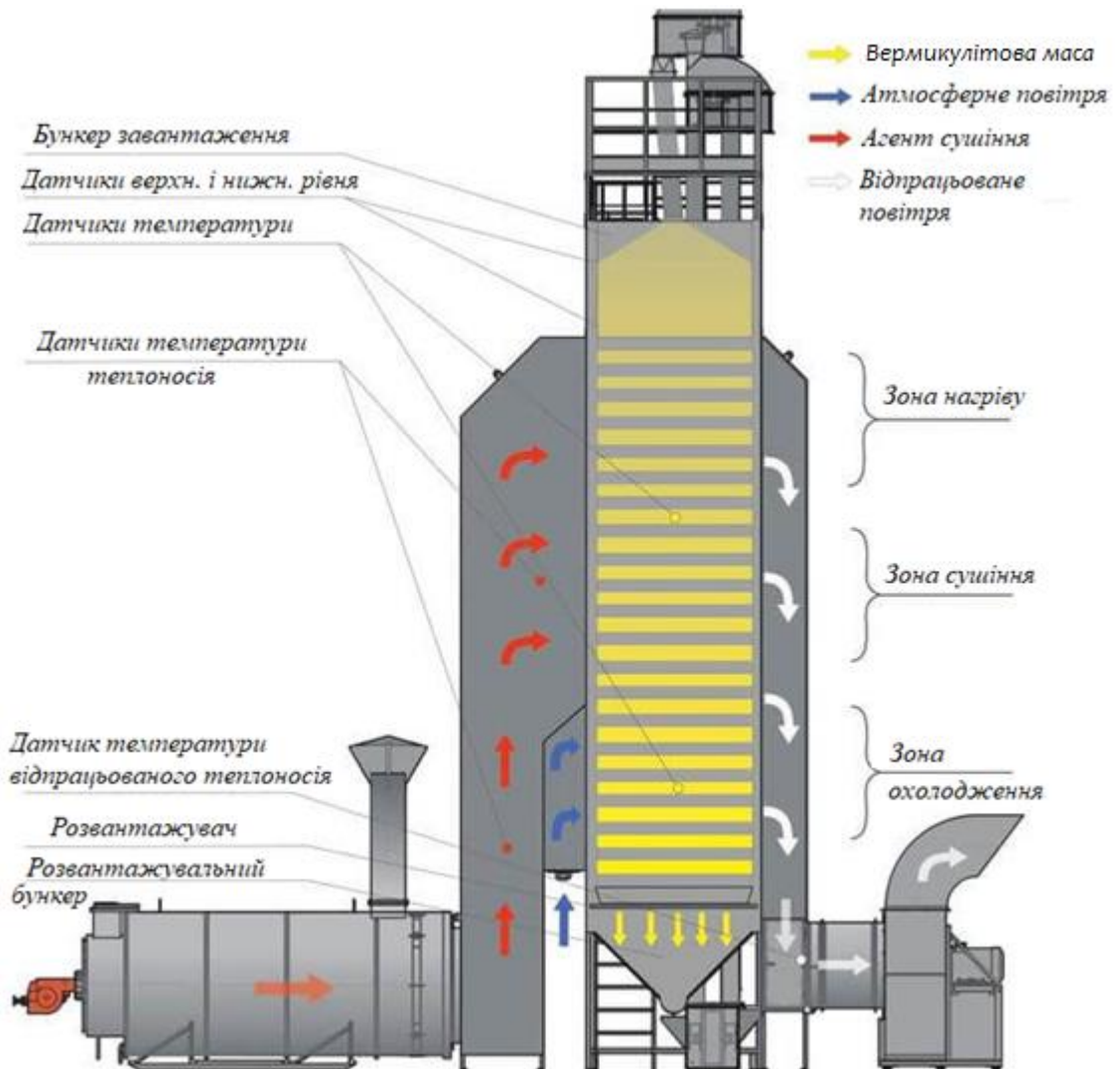


Рис. 1.4. Конструкція шахтної сушарки вермикуліту

Внутрішня конструкція сушарного модуля поділена на три основні зони:

- Зона нагріву – попередній прогрів вермикуліту до робочої температури сушіння.
- Зона сушіння – основна частина, де з матеріалу випаровується фізично зв'язана волога.
- Зона охолодження – охолодження висушеного матеріалу перед подачею в установку спучування.

Між двома паралельними шахтами розташована розподільна камера, поділена на сегменти, до яких підведені газоходи для подачі теплоносія. У

верхні зони подається сушильний агент (тепле повітря), а в нижню зону – атмосферне повітря для охолодження.

Агент сушіння нагрівається у теплогенераторі до 100 °С. Це повітря подається в короба підведення, проходить через сипкий шар вермикуліту та виводиться через короба відведення, які утворюють перехресний потік. Завдяки шаховому розташуванню коробів, забезпечується рівномірний прогрів і видалення вологи.

Для нагрівання агенту сушіння застосовується теплогенератор другого типу, в якому повітря нагрівається у теплообміннику, а продукти згорання не контактують із вермикулітом [9]. Такий підхід виключає потрапляння домішок у матеріал і забезпечує його екологічну безпеку. Теплогенератор обладнаний камерою згорання з нержавіючої жаростійкої сталі та системою ребер для посилення тепловіддачі.

Контроль за температурою здійснюється за допомогою системи датчиків у зонах теплоносія та шару вермикуліту. Регулювання температури виконується автоматично шляхом управління форсунками і заслінками повітропроводів.

Нагрів і подача повітря здійснюється наступним чином (див. рис. 1.6). З розташованої поза приміщенням ємності (1) паливо самопливом по паливопроводах через паливний бак (13) та відстійник (12) потрапляє до паливного насоса. Паливний насос (11), який приводиться в дію електродвигуном вентилятора форсунки (7), подає паливо під тиском через електромагнітний клапан (10) до пальника (8).

Одночасно вентилятор форсунки (7) подає повітря для горіння. У пальнику (8) паливо і повітря отримують обертальний рух у протилежних напрямках, утворюючи на виході робочу суміш, яка запалюється іскрою від трансформатора запалювання (6).

Продукти згорання проходять через теплообмінник (5), передаючи своє тепло повітря, яке подається головним вентилятором (3). Очищене гаряче повітря потрапляє в сушильну камеру, а продукти згорання виводяться через димову трубу (4).

Для сушіння вермикуліту використовується сушильний агент (повітря), нагрітий до температури 100 °С. Це є оптимальною температурою, що забезпечує ефективне сушіння при мінімальному ризику термічного пошкодження матеріалу.

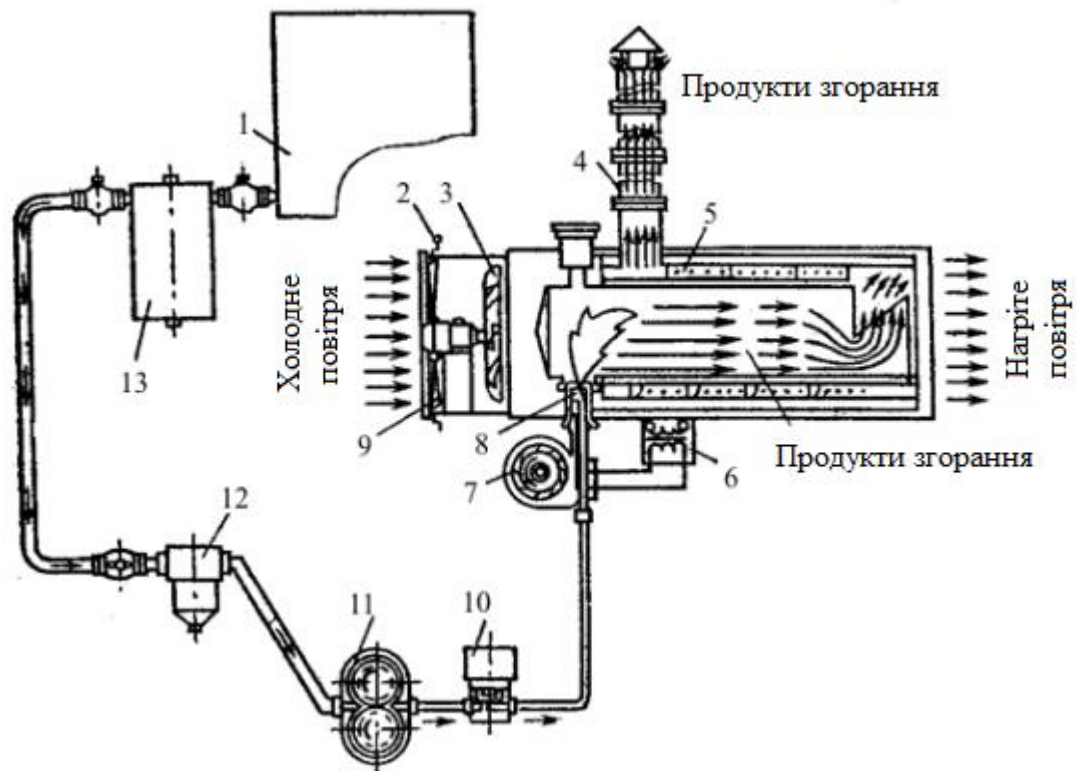


Рис. 1.6. Функціональна схема теплогенератора:

1 – ємність; 2 – рукоятка; 3 – вентилятор; 4 – димова труба; 5 – теплообмінник; 6 – трансформатор запалювання; 7 – форсунка; 8 – палик; 9 – лопаті вентилятора; 10 – клапан; 11 – паливний насос; 12 – відстійник; 13 – паливний бак

Температура сушильного агента — основний параметр процесу сушіння, тісно пов'язаний з кінцевими властивостями оброблюваного матеріалу. При сушінні вермикуліту важливо підтримувати стабільну температуру на рівні 100 °С, щоб уникнути деформацій або небажаних змін у структурі мінералу.

На відміну від зерна, вермикуліт має вищу термічну стійкість, однак перевищення допустимої температури сушіння може призвести до його передчасного розшарування або втрати властивостей при спучуванні. Крім того, в масі матеріалу можуть бути включення з різною теплопровідністю, тому при визначенні безпечної температури сушіння необхідно враховувати найменш термостійкі фракції.

У зв'язку з цим, температура сушильного агента повинна контролюватися до і після входу в сушильну камеру. Пряме вимірювання температури вермикуліту в процесі сушіння є складним через змінність теплових потоків і нерівномірність маси, тому акцент робиться саме на контроль агенту.

## 1.4 Функціональна схема автоматизації системи керування шахтною сушаркою вермикуліту

Виходячи з технологічних вимог до процесу сушіння вермикуліту в шахтній сушарці, необхідно забезпечити контроль та керування наступними параметрами:

- Рівень сировини у завантажувальному бункері (для забезпечення стабільного подавання вермикуліту до зони нагріву);
- Температура сировини на вході в сушарку (з урахуванням вологості та умов зберігання);
- Температура сушильного агента (критично важлива для забезпечення процесу спучування без перегріву);
- Температура вермикуліту в зоні сушіння (контроль необхідного теплового режиму для досягнення спучування);
- Температура та стан продукту на виході (вихідна температура як показник повноти спучування та завершення процесу);
- Керування системами подавання та вивантаження, що дозволяє точно регулювати тривалість перебування вермикуліту в зоні обробки.

Структура автоматизованої системи керування сушаркою для вермикуліту наведена на рис. 1.8

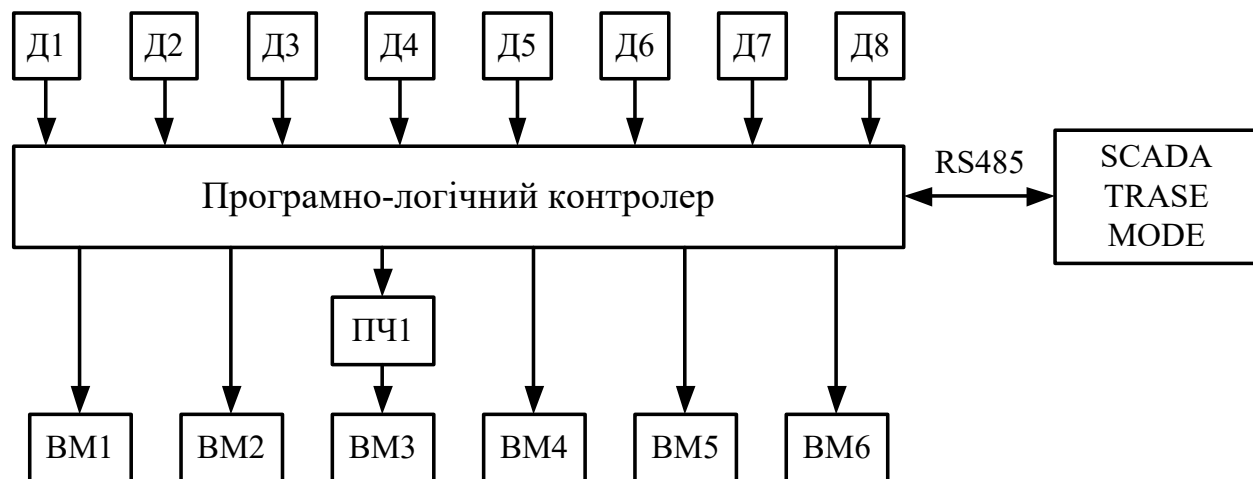


Рис. 1.8. Структура комп'ютерно-інтегрованої САК шахтною сушаркою для вермикуліту

На схемі прийнято такі позначення:

- Д1, Д2 – датчики рівня завантаження шахти вермикулітом;
- Д3, Д4 – датчики температури та вологості вхідної сировини;

- Д5 – датчик температури сушильного агента (повітря або газової суміші);
  - Д6 – температурний контроль у центральній зоні сушарки;
  - Д7, Д8 – датчики температури та візуального контролю спучування на виході;
- ВМ1 – електродвигун вентилятора подавання сушильного агента;  
 ВМ2 – вентилятор охолодження продукту після спучування (за потреби);  
 ВМ3 – розвантажувальний шнек (керується ПЧ1, частотним перетворювачем);  
 ВМ4 – механізм подавання сировини (подача в бункер);  
 ВМ5 – розподільник напрямку потоку сировини (повторний прохід або вихід);  
 ВМ6 – механізм вивантаження готового спученого вермикуліту.

Алгоритм функціонування системи керування:

1. Запуск ПЛК та активація початкового етапу продування шахти холодним повітрям (М1, М2 вмикаються).
2. Після продування (5–10 хв) активується система подавання сировини (М4) у завантажувальний бункер до спрацювання датчика верхнього рівня (Д1).
3. Вмикається теплогенератор, і агент сушіння подається в нижню частину шахти (початок процесу нагріву та спучування).
4. Через заданий проміжок часу активується розвантажувальний шнек (М3), швидкість якого регулює тривалість перебування сировини в гарячій зоні.
5. Контроль температури (Д5, Д6) та оцінка стану продукту (Д8) дозволяє ПЛК автоматично коригувати параметри сушіння та змінювати режим вентиляції, подачі, або вивантаження.
6. Якщо вермикуліт не досяг бажаного ступеня спучування, активується М5 на рециркуляцію (повторне проходження).
7. Якщо спучування завершено – М5 перемикається на вихід, вмикається М6.
8. Після спорожнення шахти (спрацювання Д2), ПЛК завершує процес: вимикає вентилятори, теплогенератор та подаючі механізми у визначеній послідовності.

Система дає змогу автоматично контролювати процес розширення вермикуліту з мінімальною участю оператора, що критично для збереження однорідності та якості кінцевого матеріалу.

## 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

### 2.1 Розробка математичної моделі об'єкта автоматизації

Процес сушіння поділяється на два етапи [1]. На першому етапі видаляється волога, яку можна розглядати, як випарювання вологи з вільної поверхні. На другому етапі видаляється зв'язана волога. В цей період тиск водяної пари на поверхні матеріалу стає функцією від температури матеріалу і його вологості на поверхні. По табличних даних [10] було отримане рівняння залежності тиску насиченої водяної пари від температури, мм. рт. ст.:

$$P_{нас} = 5.343124 + 0.027872 \cdot t + 0.032135 \cdot t^2 - 3.40325 \cdot 10^{-4} \cdot t^3 + 7.719212 \cdot 10^{-6} \cdot t^4$$

(2.1)

Це рівняння можна використати для визначення вологовмісту пароводяної суміші (кг водяної пари/кг сухого повітря):

$$dn = 0.622 \cdot \frac{\varphi \cdot P_{нас}}{Pb - \varphi \cdot P_{нас}},$$

(2.2)

де: 0,622 – відношення мольних мас водяної пари і повітря;

$\varphi$  - відносна вологість повітря;

$Pb$  – загальний (барометричний) тиск парогазової суміші.

Розглянемо процес сушіння вермикуліту в статичному режимі у вигляді матеріальних і енергетичних балансів. Математична модель сушіння у вигляді «чорного ящика» [14] показана на рис. 2.1.

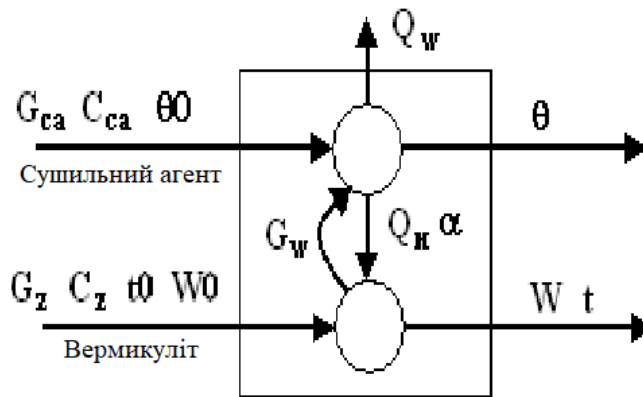


Рис. 2.1. Структурна схема процесу сушіння вермикуліту

В структурній схемі процесу сушіння:  $G_{ca}$ ,  $G_z$  – витрати сушильного агента і вермикуліту,  $C_{ca}$ ,  $C_z$  – теплоємність сухого повітря і вермикуліту,  $t_0$  і  $\theta_0$  – початкові значення температури вермикуліту і сушильного агента,  $t$  і  $\theta$  – температури цих самих продуктів на виході сушарки,  $W_0$  і  $W$  – початковий і кінцевий вологовміст вермикуліту,  $G_w$  – випарена волога із вермикуліту,  $Q_n$  і  $Q_w$  – витрати тепла на нагрівання вермикуліту і випарювання вологи,  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі від повітря до вермикуліту.

Наведемо рівняння енергетичних балансів по сушильному агенту, гарячому повітрю і вермикуліту. Вважаємо, що тепло нагрітого повітря витрачається на підігрівання вермикуліту і випарювання вологи з нього:

$$\begin{aligned} G_{ca} \cdot C_{ca} - Q_w - Q_n - Q_{ca\text{вих}} &= 0 \\ G_z \cdot C_z + Q_n - Q_{z\text{вих}} &= 0 \end{aligned} \quad (2.3)$$

Матеріальний баланс по вермикуліту:

$$G_z - G_w - G_{z\text{вих}} = 0 \quad (2.4)$$

де:  $Q_{ca\text{вих}}$ ,  $Q_{z\text{вих}}$ ,  $G_{z\text{вих}}$  – витрати тепла сушильного агента і вермикуліту, а також маса вермикуліту на виході із сушарки.

Оскільки перший період займає незначну частину часу сушіння вермикуліту, то ми розглянемо сушіння основного другого періоду. В цей період сушіння пов'язане з переміщенням вологи всередині матеріалу.

Рушійною силою цього періоду сушіння є різниця між вологовмістом вермикуліту  $W$  і рівноважним вологовмістом  $W_p$ .

Швидкість сушіння тоді матиме вигляд:

$$-\frac{dW}{d\tau} = K(W - W_p) \quad (2.5)$$

де  $K$  – коефіцієнт сушіння, який характеризує інтенсивність процесу вологообміну.

Коефіцієнт сушіння  $K$  знаходиться експериментально. Якщо на другому етапі швидкість сушіння представити прямою, то коефіцієнт сушіння буде рахуватися так:

$$K = \frac{1}{R} \cdot \frac{1}{\frac{1}{\beta} + \frac{4 \cdot R}{\pi^2 a_m}} \quad (2.6)$$

де:  $R$  – визначальний геометричний розмір вермикуліту, яке висушуємо, м;

$\beta$  – коефіцієнт зовнішнього вологообміну, м/с.;

$a_m$  – коефіцієнт потенціалопровідності масопереносу, м<sup>2</sup>/с.

Коефіцієнт потенціалопровідності масопереносу аналогічний коефіцієнту температуропровідності і залежить в основному від форм зв'язку вологи з матеріалом і температури матеріалу і визначає внутрішній перенос вологи.

Допускаємо, що процес нагрівання частинок матеріалу безградієнтний, а вологість по об'єму рівномірна і втрат в навколишнє середовище немає. Складемо рівняння теплового балансу для визначення зв'язку між нагріванням і швидкістю сушіння. Для періодичного процесу сушіння це буде рівняння, де температура і вологовміст змінюється в часі:

$$\frac{d\bar{\theta}}{d\tau} G'c - \frac{d\bar{W}}{d\tau} rG'_0 = \alpha \cdot F(t - \bar{\theta}) \quad (2.7)$$

Для безперервного процесу температура і вологовміст вермикуліту змінюється по довжині сушарки:

$$\frac{d\bar{\theta}}{dx} G \cdot c - \frac{d\bar{W}}{dx} r G_0 = \alpha \cdot F(t - \bar{\theta}) \quad (2.8)$$

де  $\bar{\theta}$  - середня температура матеріалу;

$\bar{W}$  - середній вологовміст матеріалу;

$c$  – питома теплоємність матеріалу;

$r$  – теплота пароутворення;

$t$  – температура сушильного агенту;

$G$  і  $G_0$  – витрати вологого і сухого матеріалу;

$\alpha$  - коефіцієнт теплообміну;

$F$  – площа поверхні матеріалу;

$\tau$  – час;

$x$  – координата ( у напрямку руху вермикуліту).

Розглянемо процес сушіння в сушарці безперервної дії. Математична модель сушарки буде спрощеною і не враховувати першого етапу сушіння, етапу нагрівання вермикуліту. Коефіцієнт тепловіддачі від сушильного агенту до вермикуліту також буде вважатися постійною величиною. Значення змінних в рівняннях для визначення коефіцієнту сушіння  $K$ , рівноважного вологовмісту  $W_p$  використані по даних вчених, які вивчали процес сушіння вермикуліту.

Таким чином рівняння рівноважного вологовмісту, в частках до вмісту сухих речовин, має вид:

$$W_p = 0.01 \cdot \left[ \frac{|\ln(1 - \varphi)|}{5.47 \cdot 10^{-6} \cdot (t + 273)} \right]^{0.435} \quad (2.9)$$

Значення відносної вологості повітря знаходимо з рівняння:

$$\varphi = \frac{(P_b - P_{нас}) \cdot dn}{0,0622 \cdot P_{нас}} \quad (2.10)$$

Коефіцієнт сушіння, 1/с, знаходимо з рівняння:

$$K = \frac{5.55 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 - 0.00796 \cdot t}{3600} \quad (2.11)$$

Рівняння статички процесу сушіння, перетворимо на рівняння динаміки і складемо систему диференційних рівнянь по температурі вермикуліту, сушильного агента (повітря) в град С і вмісту вологи у вермикуліті, в частках.

Приведемо рівняння:

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{G_z \cdot \sigma \cdot \alpha}{G_{ca} \cdot C_{ca}} \cdot (\theta - t) \quad (2.12)$$

$$\frac{d\theta}{d\tau} = \frac{\sigma \cdot \alpha}{C_{ca}} \cdot (t - \theta) + \frac{r \cdot 10^{-2}}{C_z \cdot (1 + 0,2\%)} \cdot \frac{d0,2\%}{d} \quad (2.13)$$

$$\frac{dW}{d\tau} = -K \cdot (W - W_p) \quad (2.13)$$

де  $\sigma$  – питома поверхня вермикуліту м<sup>2</sup>/кг;

$\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі від повітря до вермикуліту, Вт/м<sup>2</sup> град;

$r$  – теплота пароутворення, Дж/кг.

## 2.2 Розробка та дослідження імітаційної моделі об'єкта автоматизації із використанням математичних пакетів MATLAB та MathCad

Вихідними даними для імітаційного моделювання процесу сушіння вермикуліту є наступні:

- витрати вермикуліту на сушіння складають  $G_z = 2,1$  кг/с;
- температура вермикуліту  $t_0 = 23$  °С;
- теплоємність вермикуліту  $C_z = 2300$  Дж/(кг °С);
- початковий вологовміст  $W_0 = 0,175$ .

Сушильний агент, гаряче повітря, подається в кількості  $G_{ca} = 1,5$  кг/с з температурою  $\theta_0 = 70$  °С, і теплоємністю  $C_{ca} = 1150$  Дж/(кг °С).

Прийнято, що питома поверхня вермикуліту  $\sigma = 2,47$  м<sup>2</sup>/кг [10];

- вологовміст пароводяної суміші в сушарці  $dn = 0,006$  кг пари/кг сухого повітря,

- теплота пароутворення  $r = 2500 \cdot 10^3$  Дж/кг;

- барометричний тиск  $Pb = 750$  ммрт. ст.;

- коефіцієнт тепловіддачі від повітря до вермикуліту  $\alpha = 15,3$  Вт/(м<sup>2</sup>°С).

Розробимо модель в середовищі Simulink MATLAB [2]. Так як модель достатньо громіздка, розіб'ємо її на дві частини. В основній частині (рис. 2.2.) розмістимо рівняння, які представляють із себе систему диференціальних рівнянь і розраховують температуру вермикуліту, температуру повітря і вологовміст вермикуліту.

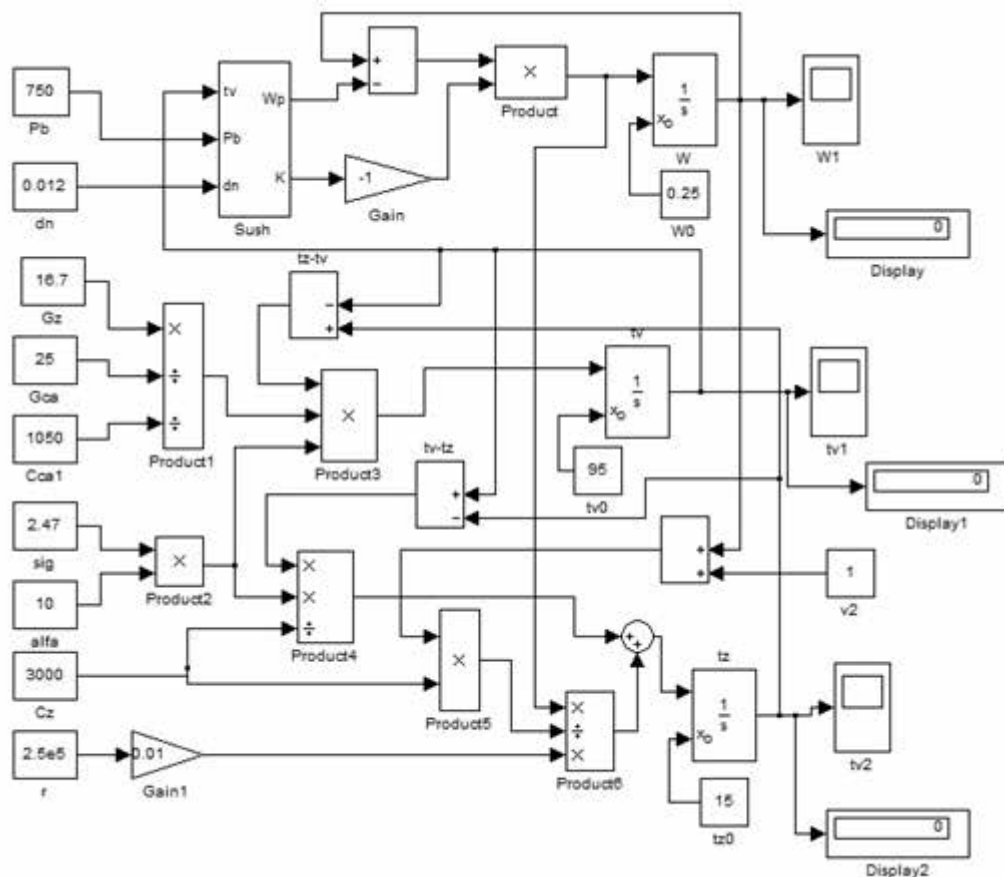


Рис. 2.2. Схема імітаційної моделі сушарки у середовищі SimulinkMATLAB

Для допоміжних рівнянь, які рахують тиск насиченої водяної пари, відносну вологість повітря, рівноважний вологовміст і коефіцієнт сушіння створимо підсистему [13] (рис. 2.3.).

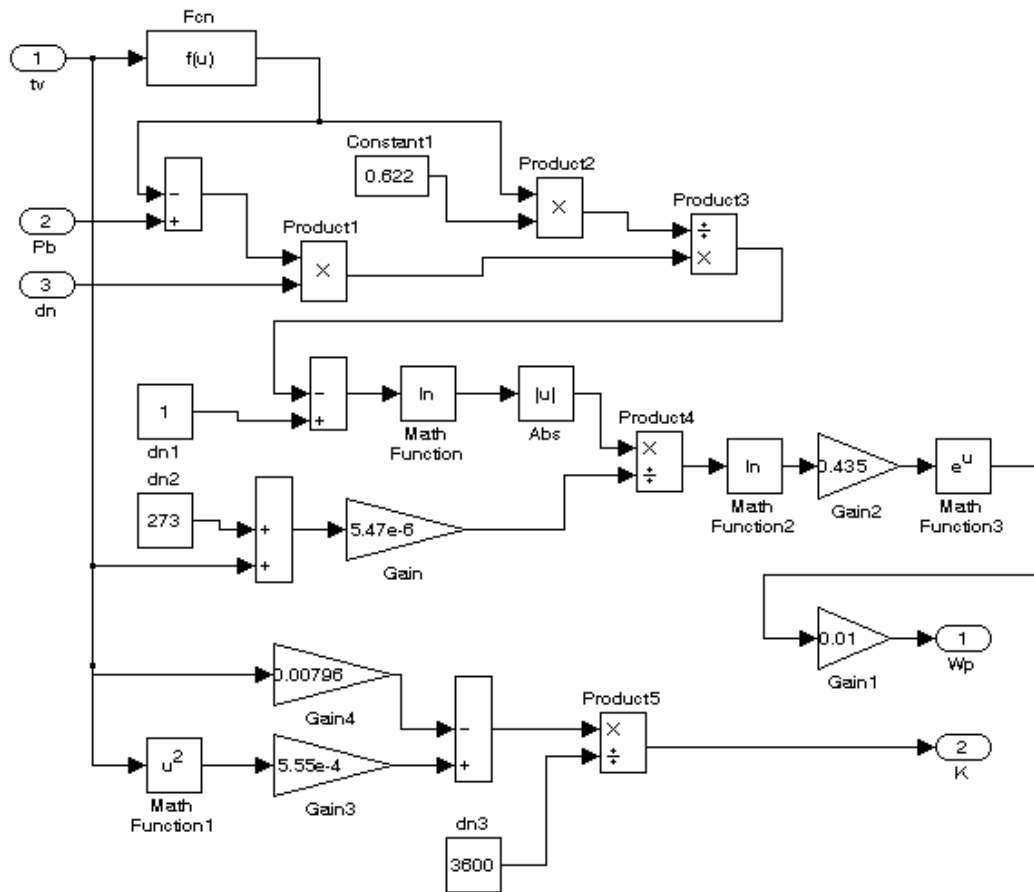


Рис. 2.3. Імітаційна модель підсистеми моделі сушарки в середовищі MatlabSimulink

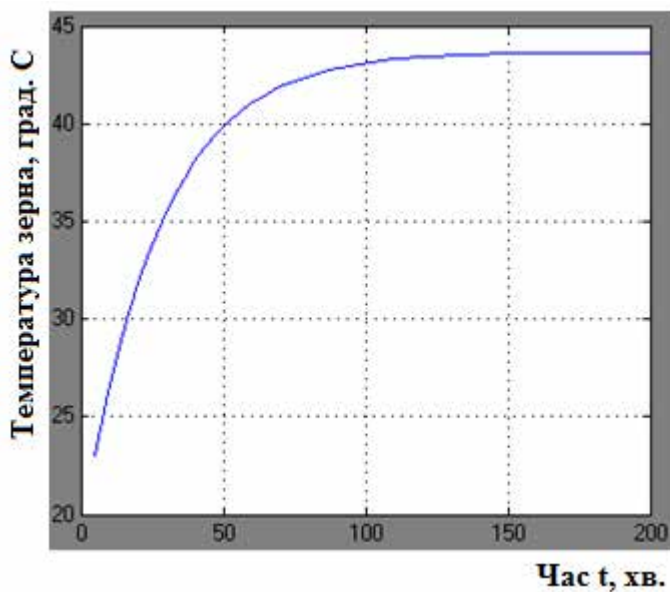


Рис. 2.4. Зміна температури вермикуліту під час сушіння

В результаті проведеної операції отримаємо розгінні криві температур вермикуліту (рис. 2.4) і сушильного агента під час сушіння (рис. 2.5) і криву зміни вологовмісту вермикуліту (рис. 2.6).

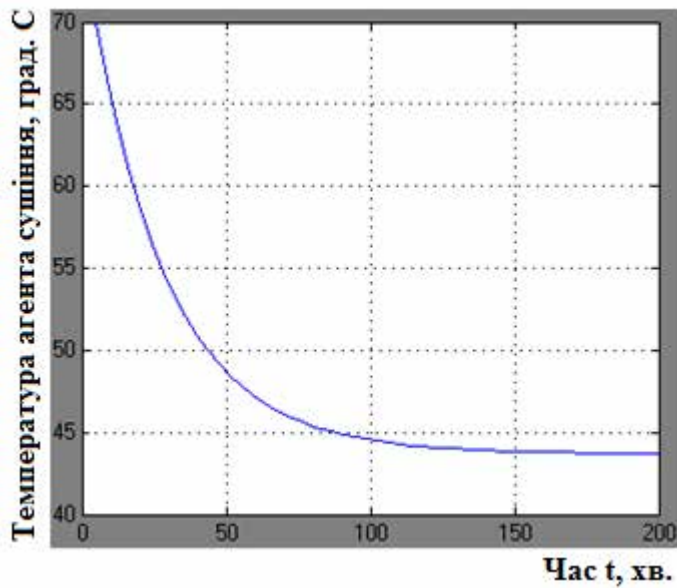


Рис. 2.5. Зміна температури агента сушіння

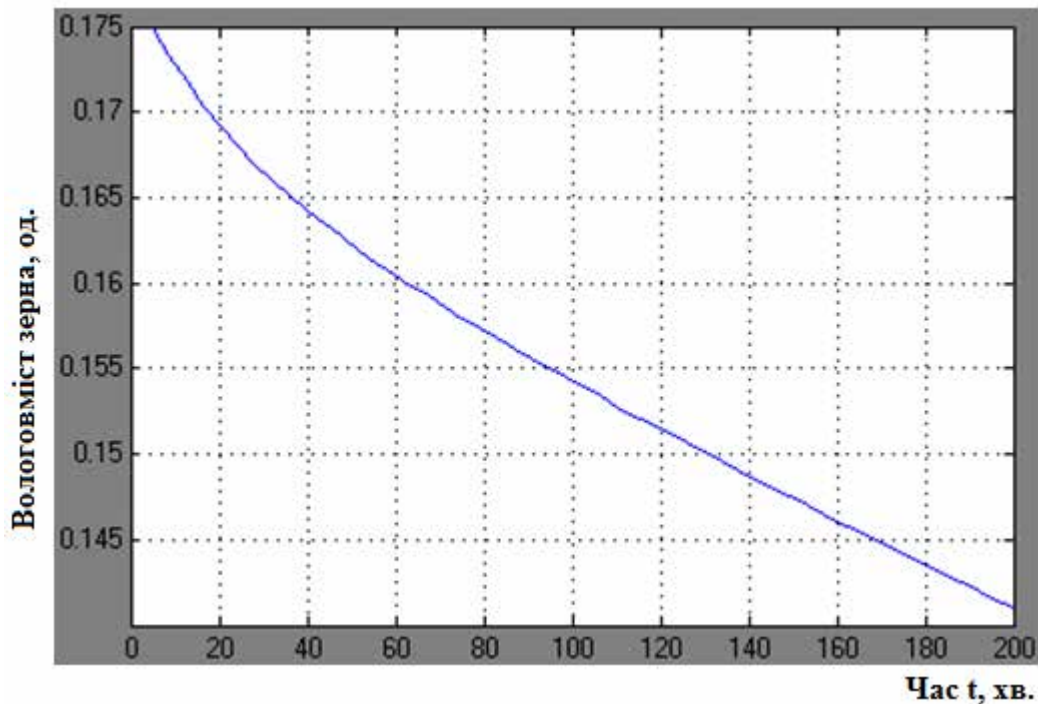


Рис. 2.6. Зміна вологовмісту вермикуліту під час його сушіння

Дослідимо вплив витрат вологого вермикуліту на температуру сушильного агента, вологовміст на виході при постійному початковому

вологівмісті  $W_0=0,175$  та зміну температури сушильного агента під час сушіння при постійній витраті вологого вермикуліту  $G_z = 2,1$  кг/с.

Температура сушильного агента змінюватиметься у межах від  $50^\circ\text{C}$  до  $83^\circ\text{C}$ .

### 2.3 Визначення передатної функції шахтної сушарки вермикуліту для каналу керування температурою вермикуліту

Для визначення динамічних характеристик шахтної сушарки вермикуліту як об'єкта управління була використана його розгінна характеристика, яка представляє собою залежність температури вермикулітової маси від часу, при ступінчастій зміні керуючої дії: зменшенні експозиції (тривалості) сушіння за рахунок збільшення витрати вермикуліту на виході з сушарки. Розгінна характеристика побудована за даними (рис. 2.4). При цьому час із хвилин переведено у секунди.

Для визначення передатної функції шахтної сушарки вермикуліту для каналу керування був використаний графічний метод [19].

Для цього розгінна характеристика була пронормована за виразом

$$y(t_i) = \frac{y(t_i) - y(t_0)}{y(\infty) - y(t_0)} = \frac{y(t_i) - 15}{100 - 15} \quad (2.1)$$

4)

Результати розрахунку занесені в таблицю (Додаток А), нормована розгінна характеристика шахтної сушарки вермикуліту для каналу керування зображена на рис. 2.11.

Для статичних об'єктів передатна функція, отримана за кривою розгону, представляється у вигляді інерційної ланки із запізненням

$$W(s) = \frac{k_{OY} \cdot e^{-\tau_{OY} \cdot s}}{T_{OY} \cdot s + 1}, \quad (2.1)$$

5)

де  $k_{OY}$  - коефіцієнт передачі об'єкта;

$T_{OY}$  - постійна часу об'єкта, що характеризує його інерційність, с;

$\tau_{OY}$  - час чистого запізнення, с.

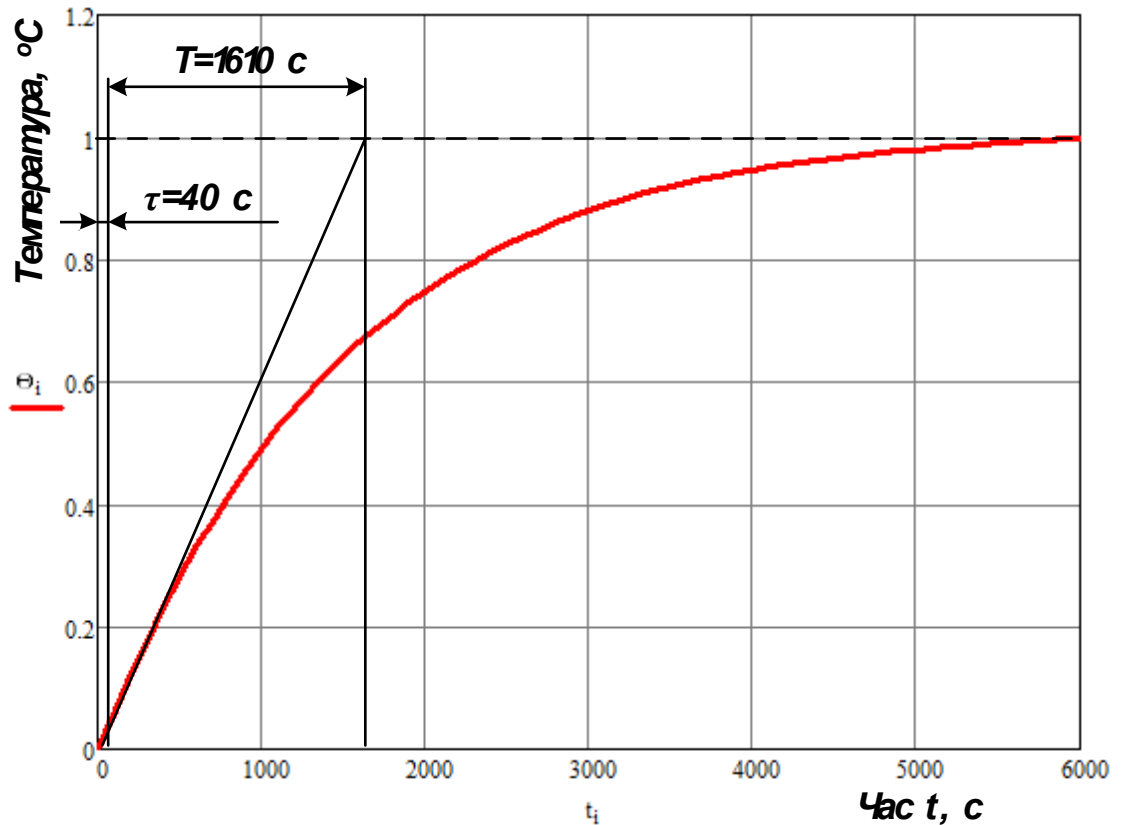


Рис. 2.11. Нормована розгінна характеристика шахтної сушарки вермикуліту для каналу керування температурою сушіння вермикуліту

Чисельне значення постійної часу  $T_{ov}$  та часу запізнення  $\tau_{ov}$  об'єкта знаходять за допомогою дотичної, яку проводять до точки перегину розгінної характеристики (рис. 2.11). Точка перегину відповідає середині відрізка часу, на якому спостерігається максимальний приріст ординати кривої розгону.

Коефіцієнт передачі об'єкта керування визначаємо за формулою

$$k_{ov} = \frac{T_K - T_{II}}{L_K - L_{II}}, \quad (2.16)$$

де  $T_K$  та  $T_{II}$  – відповідно кінцева та початкова температура повітря вермикуліту при сушінні у шахтній сушарці, °C;

$L_K$  та  $L_{II}$  – відповідно кінцеве та початкове відносне значення продуктивності системи розвантаження шахтної сушарки, %.

$$T_K = 54^\circ\text{C}, T_{II} = 15^\circ\text{C}; L_K = 100\%, L_{II} = 0\%.$$

$$k_{oy} = \frac{54-15}{100-0} = \frac{39}{100} = 0,39 \left[ \frac{^{\circ}C}{\% \text{ продуктивн.}} \right]$$

Значення постійної часу та часу чистого запізнення визначені з нормованої розгінної характеристики. Час чистого запізнення визначається часом, що необхідний на проходження повітря повітропроводом шахтної сушарки вермикуліту та початку сушіння.

$$T_{oy} = 1610 \text{ с}, \tau_{oy} = 40 \text{ с.}$$

Отримаємо передатну функцію бункера для каналу керування температурою сушіння

$$W_{oy}(s) = \frac{0,39 \cdot e^{-40 \cdot s}}{1610 \cdot s + 1}.$$

### 3 ВИБІР РЕГУЛЯТОРА ТА ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЙОГО НАЛАШТУВАНЬ

#### 3.1 Вибір алгоритму керування та визначення параметрів настройки регулятора

Будь-яка автоматизована система керування включає регулятор і керований об'єкт. Вибір оптимального алгоритму керування значною мірою залежить від динамічних характеристик об'єкта. Як показано, для правильного визначення алгоритму можна орієнтуватися на співвідношення між часом чистого запізнення об'єкта та його сталою часу, тобто  $\frac{\tau_{oy}}{T_{oy}}$  [19]. з цією метою передавальну функцію статичного об'єкта слід подати у формі виразу (2.15). При визначенні типу регулятора доцільно враховувати значення співвідношення між часом запізнення та сталою часу об'єкта керування  $\frac{\tau_{oy}}{T_{oy}}$ :

- якщо  $\frac{\tau_{oy}}{T_{oy}} < 0,2$ , зазвичай надають перевагу позиційному (релейному) алгоритму керування, хоча застосування неперервного алгоритму також не виключається. Остаточний вибір залежить від специфічних технологічних вимог до процесу керування.

- якщо  $0,2 < \frac{\tau_{oy}}{T_{oy}} < 1,0$ , перевагу віддають неперервному або цифровому алгоритму керування (П-, ПІ- або ПІД-алгоритм керування)

- якщо  $\frac{\tau_{oy}}{T_{oy}} > 1,0$ , вибирають спеціальний цифровий регулятор з екстраполятором, який компенсує запізнювання в контурі керування.

До того ж, для обґрунтованого вибору алгоритму керування та відповідного йому типу регулятора слід враховувати не лише характеристики об'єкта і вимоги технологічного процесу, але й деякі конструктивні особливості самих регуляторів. Варто пам'ятати, що промислові регулятори

реалізують керувальні алгоритми з певною похибкою, яку необхідно враховувати при виборі всіх технічних засобів, що входять до системи автоматичного керування.

В даному випадку передатна функція шахтної сушарки вермикуліту для каналу керування температурою сушіння  $W_{ov}(s) = \frac{0,39 \cdot e^{-40 \cdot s}}{1610 \cdot s + 1}$ , при цьому

відношення  $\frac{\tau_{ov}}{T_{ov}} = \frac{40}{1610} = 0,025$ , тому за вказаною методикою необхідно

використати позиційний алгоритм керування.

Однак слід враховувати низку технологічних умов:

- по-перше, неприпустимість перегріву вермикуліту в процесі сушіння;
- по-друге, згідно з розробленою функціональною схемою автоматизації системи керування шахтною сушаркою вермикуліту, температура сушіння визначається тривалістю перебування матеріалу в зоні сушіння. Оскільки вермикуліт безперервно переміщується крізь об'єм шахти, швидкість цього переміщення залежить від роботи розвантажувального шнека. Останній керується частотним перетворювачем, який змінює швидкість обертання вихідного вала електродвигуна приводу шнека [15]. Таким чином, рух вермикулітового потоку в системі є безперервним.

Як відомо, частотні перетворювачі забезпечують плавне регулювання частоти обертання вала електродвигуна. Однією з характерних рис таких пристроїв є реалізація керування на основі ПД-алгоритму.

З огляду на технологічні вимоги та конструктивні особливості обладнання системи керування, було прийнято рішення застосувати неперервний ПД-алгоритм без виконання додаткових розрахунків динамічного коефіцієнта регулювання згідно з методикою [19].

### 3.2. Реалізація алгоритму керування

Відповідно до функціональної схеми автоматизації, система керування включає:

- програмно-логічний контролер (ПЛК), який отримує дані від датчиків рівня (верхнього та нижнього) вермикуліту в надсушильному бункері, а також від датчиків температури і вологості в різних зонах шахтної сушарки вермикуліту згідно з технологічними вимогами процесу сушіння (детальніше розглянуто в пункті 1.4), та формує сигнали керування для виконавчих механізмів — частотного перетворювача і електродвигунів;

- два модулі розширення аналогових входів, призначені для підключення аналогових датчиків температури й вологості до ПЛК;

- частотний перетворювач, який реалізує безпосереднє керування швидкістю обертання вала електродвигуна приводу розвантажувального шнека на основі ПД-алгоритму, що дозволяє регулювати експозицію сушіння вермикуліту — тобто час проходження вермикулітової маси через усі зони шахти сушарки [21].

- Електрообладнання забезпечує керування відповідними електродвигунами, зокрема електродвигунами приводу відцентрових вентиляторів, які подають агент сушіння у зону нагріву та сушіння, подають повітря в зону охолодження вермикуліту, а також електродвигунами приводів норій та транспортерів.

Детальний підбір електрообладнання для запуску й захисту електродвигунів, організації комутації кіл керування, ручного керування та світлової індикації розглядається в розділі 5 кваліфікаційної бакалаврської роботи. Окремо, вибір програмно-логічного контролера, модулів розширення для підключення датчиків, а також самих датчиків температури, вологості й рівня подано в наступних розділах.

-

### 3.2.1 Вибір програмно-логічного контролера та модулів розширення підключення датчиків температури та вологості

Згідно з технічним завданням на виконання магістерської роботи, для керування технологічним обладнанням, зокрема частотним перетворювачем, що регулює електродвигун вивантажувального шнека, було обрано програмований логічний контролер ПЛК73 виробництва ОВЕН (рис. 3.1) [3].



Рис. 3.1. Програмований логічний контролер ПЛК73 ОВЕН

Контролер призначений для побудови систем автоматизованого керування технологічними процесами в енергетиці, транспортній сфері (включаючи залізничний транспорт), різних галузях промисловості, а також у житлово-комунальному та сільському господарстві. Логіка функціонування ПЛК задається користувачем під час програмування пристрою. Для цього використовується програмне забезпечення CoDeSys версії 2.3.

Контролер може використовуватись у таких ролях:

- як спеціалізований пристрій для керування окремим локалізованим об'єктом;

- як засіб моніторингу локального об'єкта в межах інтегрованої інформаційної системи;
- як пристрій для керування та моніторингу групи локалізованих об'єктів у складі комплексної мережі збору та обробки даних.

Контролер підтримує такі основні функції:

- виконання програми користувача, створеної у середовищі CoDeSys 2.3;
- зчитування аналогових і дискретних сигналів з вбудованих входів та передача даних у програму;
- керування вбудованими виходами згідно з алгоритмами програми користувача;
- можливість підключення додаткових входів/виходів через модулі розширення за допомогою спеціального інтерфейсу;
- передача даних через інтерфейси RS-485 та RS-232;
- виведення символічної інформації на рідкокристалічний дисплей відповідно до налаштувань у програмі користувача;
- індикація заданих параметрів за допомогою шести вбудованих світлодіодів;
- ведення точного відліку часу завдяки вбудованому годиннику з автономним живленням;
- налаштування параметрів вбудованих входів, виходів та іншого обладнання з подальшим збереженням конфігурації в енергонезалежній пам'яті (зміна параметрів можлива з CoDeSys або за допомогою вбудованого індикатора та клавіатури).

Технічні характеристики програмно-логічного контролера ПЛК73 ОВЕН наведені у додатку Б.

Як буде показано далі, для вимірювання температури вермикуліту, температури та вологості агента сушіння передбачається використання

аналогових датчиків температури і вологості. Для їх підключення застосовуються модулі розширення аналогових входів ОВЕН МВ110-224.8А, які розроблено для розширення функціональних можливостей ПЛК різних типів виробництва компанії ОВЕН, зокрема ПЛК73.

Модуль аналогового вводу ОВЕН МВ110-224.8А призначений для зчитування аналогових сигналів, перетворення їх у фізичні значення з подальшою передачею по мережі RS-485. Технічні характеристики модуля наведені в додатку В.

### *3.2.2 Вибір датчиків температури вермикуліту та агенту сушіння та визначення їх передатних функцій*

До первинних вимірювальних перетворювачів (ПВП), які використовуються у системі сушіння вермикуліту, висуваються такі вимоги:

- лінійна та однозначна статична характеристика (допустима нелінійність не повинна перевищувати 0,1...3,0%);
- висока чутливість до змін контрольованого параметра;
- стабільність параметрів упродовж тривалого часу експлуатації;
- висока швидкодія;
- стійкість до хімічного впливу середовища, що контролюється, та навколишніх умов (пристрої встановлюються в захисному корпусі);
- мінімальний зворотний вплив на об'єкт контролю, зручність встановлення та технічного обслуговування.
- Процес підбору вимірювальних перетворювачів, що входять до складу регулятора, відбувається у два етапи:
  - спочатку визначається тип перетворювача відповідно до контрольованого параметра об'єкта сушіння та умов його роботи;
  - на другому етапі після вибору всіх компонентів регулятора за каталогами уточнюється типорозмір перетворювача.

ПВП рекомендується добирати так, щоб діапазон його вимірювання охоплював зміну контрольованої величини з мінімальним відхиленням, при цьому враховуючи потребу в перевантажувальній здатності та сумісності з обраним електронним регулятором. Важливим критерієм вибору є також швидкодія ПВП, яка визначається його часовою сталою, тобто інерційністю. Для меж вимірювання температури вермикуліту та агента сушіння скористаємося даними пункту 1.3 кваліфікаційної роботи. Відповідно до них, допустима температура повітря як агента сушіння становить 90...100 °С, а температура самого вермикуліту повинна залишатися в межах цих же значень залежно від режиму сушіння.

Щоб під час вимірювання температури вермикуліту первинний вимірювальний перетворювач не вносив неприпустиму динамічну похибку, його постійна часу  $T_{ПВП}$  має бути щонайменше на порядок меншою, ніж постійна часу об'єкта  $T_{ov}$ . У даному випадку постійна часу об'єкта ТОВ = 1610 с., отже, максимально допустиме значення постійної часу перетворювача не повинно перевищувати  $1610/10=161$  с.

З урахуванням вимог до діапазону вимірювання, інерційності та специфіки підключення температурних датчиків до модулів розширення аналогових входів ОВЕН МВ110-224.8А, було обрано термоперетворювач опору у загальнопромисловому виконанні — модель ОВЕН ДТС125Л. Його технічні характеристики наведено в таблиці 3.1.

Термоперетворювачі типу ДТС125Л з уніфікованим вихідним сигналом призначені для безперервного вимірювання температури середовищ (газоподібних, парових, рідинних або сипких) і перетворення її у відповідний струмовий сигнал 4–20 мА для віддаленої передачі. Пристрій складається з термозонда та розміщеного в головці вимірювального перетворювача, який формує вихідний сигнал 4–20 мА (рис. 3.2). Термоперетворювач ДТС125Л відповідає стандарту ДСТУ 2858-94.

Процес вимірювання температури відбувається через лінійне перетворення термочутливим елементом температури середовища у зміну

омічного опору, який надалі перетворюється вимірювальним перетворювачем у струмовий сигнал на виході.

Таблиця 3.1.

Основні технічні характеристики термоперетворювача опору ДТС125Л

Діапазон вимірюваних температур, °С	0...+180
Номінальна статична характеристика (НСХ)	100М
Клас допуску	В
Показник теплової інерції, с	8 (при Ø гільзи 6мм)
Ступінь захисту від пилу та вологи	IP55
Матеріал захисної арматури	Ст. 12Х18Н10Т
Діапазон умовного тиску, мПа	0,4...4,0
Стійкість до вібрації	Група вик. N3
Кліматичне виконання	У3



Рис. 3.2 Термоперетворювач опору з уніфікованим вихідним сигналом ОВЕН ДТС125

За динамічними властивостями датчик є інерційною ланкою, передатна

функція якого має вигляд  $W_{ПВП}(s) = \frac{k_{ПВП}}{T_{ПВП} \cdot s + 1}$ .

Коефіцієнт передачі  $k_{ПВП}$  (чутливість), визначається за формулою

$$k_{ПВП} = \frac{\Delta I}{\Delta T} = \frac{20 - 4}{180 - 0} = 0,089 \frac{mA}{^{\circ}C}, \quad (3.1)$$

де  $\Delta T$  – різниця значень вимірюваних датчиком температур, °С (таблиця 3.3);

$\Delta I$  – різниця струмів, що відповідає значенням температур в робочому діапазоні, мА.

Враховуючи, що показник теплової інерції сприймаючого елемента складає  $T_{ПВП} = 8 \text{ с}$  (таблиця 3.1), передатна функція датчика ДТС125

$$W_{ПВП}(s) = \frac{k_{ПВП}}{T_{ПВП} \cdot s + 1} = \frac{0,089}{8 \cdot s + 1}.$$

### 3.2.3 Вибір датчиків вологості вермикуліту

Для вимірювання вологості вермикуліту обрано датчик вологості РСЕ-А-315(рис.3.3).

Мікрохвильовий вологомір вермикуліту РСЕ-А-315 призначений для безперервного вимірювання вологості сипких матеріалів, таких як вермикуліт, а також інших мінеральних речовин. Вимірювання здійснюється у потоці незалежно від щільності матеріалу. Вологомір попередньо відкалібрований виробником і не потребує повторного налаштування, оскільки при мікрохвильовому способі вимірювання природне дрейфування показників відсутнє. Пристрій підтримує інтерфейси 4...20 мА, RS-232 та RS-485, що дає змогу інтегрувати його в системи автоматичного керування або використовувати як реєстратор.

Принцип дії базується на різниці діелектричних властивостей між вермикулітом та водою при надвисоких частотах. Прилад випромінює малопотужні мікрохвилі, які кожні 0,2 секунди проникають у матеріал, забезпечуючи точне вимірювання вологості без порушення його цілісності.

Технічні характеристики мікрохвильового вологоміра вермикуліту РСЕ-А-315 наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 Технічні характеристики мікрохвильового вологоміра РСЕ-А-315

Діапазон вимірювання вологості при неперервному масовому потоці	5...40%
Макс. абсолютна похибка вимірювання вологості	±0,5% (5...18%); ±1,0% (>18%)
Діапазон робочої температури	+5...+55°C
Режим роботи	Неперервний
Живлення	24В пост. струму
Споживана потужність	5Вт
Вхідний сигнал	4...20мА
Вихідні сигнали	4...20мА; RS-232, RS-485
Час прогрівання при запуску	60 хв.
Вага	6,5 кг



Рис. 3.3 Мікрохвильовий вологомір вермикуліту PCE-A-315

### 3.2.4 Вибір датчиків рівня вермикуліту

Як датчик верхнього та нижнього рівня маси вермикуліту у надсушильному бункері шахтної сушарки вермикуліту обрано датчик рівня типу ДПУ-10 (рис. 3.4). Датчик (сигналізатор) рівня вібраційного типу ДПУ-10 призначений для контролю граничного рівня сипких матеріалів, що зберігаються в ємностях.



Рис. 3.4 Датчик граничного рівня сипких матеріалів ДПУ-10

Принцип дії датчика ДПУ-10 полягає в наступному: так звана «виделка» датчика коливається на власній резонансній частоті під впливом п'єзоелектричних елементів, вмонтованих усередині корпусу. Коли «виделка» занурюється у контрольований матеріал (наприклад, вермикуліт) або звільняється від нього, відбувається зміна амплітуди вібрацій. Ця зміна фіксується контролером, який подає команду на активацію сигналізації або вмикання/вимикання навантаження через релейні контакти електронного блока.

Технічні характеристики датчика рівня ДПУ-10 наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 Технічні характеристики датчика рівня сипких продуктів ДПУ-10

Принцип дії	вібраційний
Температура контролюваного матеріалу	від -40°C до +60°C
Робочий тиск	1 атм.
Робочий температурний діапазон	від -40°C до +85°C
Вага	до 2,5 кг
Матеріал резонатора датчика	нержавіюча сталь
Матеріал корпусу контролера	Сталь із антикорозійним покриттям/алюмінієвий сплав
Кліматичне виконання	УХЛ1.1
Ступінь захисту	IP65
Клас за способом захисту від ураження електричним струмом	I
Живлення	100-240 V AC, 24±10%V DC
Струм споживання	60мА
Навантаження комутації	$I_{\text{макс}} = 8\text{A}$ , $U_{\text{макс AC}} = 250\text{V}$ , $U_{\text{макс DC}} = 24\text{V}$
Режим спрацювання (верхня або нижня межа)	перемичка на платі: не встановлена – верхній рівень; встановлена – нижній рівень
Сигналізація спрацювання	Вмикання світлодіоду на платі
Час спрацювання	2-3 сек.

### 3.2.5 *Визначення передатної функції електродвигуна приводу вивантажувального шнеку як виконавчого механізму САК температурою вермикуліту*

Як уже зазначалося, експозиція сушіння вермикуліту (тобто час проходження маси вермикуліту через зони шахти сушарки вермикуліту) регулюється шляхом зміни швидкості обертання валу електродвигуна, що приводить у дію розвантажувальний шнек. Визначимо передатну функцію цього електродвигуна як виконавчого механізму системи автоматичного керування (САК).

Найбільш доцільним методом плавного регулювання частоти обертання є частотне регулювання. Можливість зміни швидкості за цим принципом впливає з виразу для синхронної швидкості обертання магнітного поля статора.

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p}, \quad (3.2)$$

з якого видно, що швидкість  $\omega_0$  є прямо пропорційною частоті  $f$  напруги, що підводиться до обмоток статора.

Виведемо передатну функцію асинхронного електродвигуна при частотному керуванні. Позначимо через  $\omega_{1V}$  швидкість обертання поля статора при частоті  $f_V$ .

Тоді відносна швидкість поля

$$v = \frac{f_V}{f_H} = \frac{\omega_{1V}}{\omega_0}, \quad (3.3)$$

де швидкість  $\omega_0$  пов'язана з частотою мережі виразом (3.2).

Введемо поняття фіктивного ковзання

$$s_\phi = \left( \frac{\omega_{1V}}{\omega_0} \right) \cdot s = v \cdot s. \quad (3.4)$$

Дійсна швидкість обертання при частоті  $f_V$

$$\omega = \omega_{1V} \cdot (1 - s). \quad (3.5)$$

Підставляючи у (3.5) значення  $\omega_{1V}$  із (3.3) з урахуванням (3.4),  
визначимо

$$\omega = \omega_0 \cdot (v - s_\phi). \quad (3.6)$$

Для малих значень ковзання обертаючий момент двигуна пропорційний  
ковзанню

$$M = \left( \frac{M_H}{s_H} \right) \cdot s_\phi. \quad (3.7)$$

Підставляючи (3.6) та (3.7) у вихідне рівняння

$$M - M_C = J \cdot \frac{d\omega}{dt}, \quad (3.8)$$

(вважаючи при цьому  $M_C = 0$ )  $J \cdot s \cdot \omega = M$ , отримаємо

$$J \cdot s \cdot \omega_0 \cdot (v - s_\phi) = \left( \frac{M_H}{s_H} \right) \cdot s_\phi. \quad (3.9)$$

Цей вираз можна представити як

$$\frac{J \cdot \omega_0 \cdot s_H}{M_H} \cdot s \cdot \frac{s_\phi}{s_H} + \frac{s_\phi}{s_H} = \frac{J \cdot \omega_0}{M_H} \cdot s \cdot v. \quad (3.10)$$

Якщо за вхідну величину прийняти відносну швидкість поля  $v$ , а за  
вихідну – відносне ковзання  $\sigma = \frac{s_\phi}{s_H}$ , то вираз (3.10) матиме вигляд

$$T_{M1} \cdot s \cdot \sigma + \sigma = T_{M2} \cdot s \cdot v, \quad (3.11)$$

$$\text{де } T_{M1} = \frac{J \cdot \omega_0 \cdot s_H}{M_H} \text{ та } T_{M2} = \frac{J \cdot \omega_0}{M_H}.$$

Тоді передатна функція асинхронного електродвигуна при частотному  
керуванні

$$W(s) = \frac{\sigma(s)}{v(s)} = \frac{T_{M2} \cdot s}{T_{M1} \cdot s + 1}. \quad (3.12)$$

На практиці при частотному керуванні часто використовують іншу методику визначення передатної функції.

Передатна функція асинхронного електродвигуна у цьому випадку

$$W_{BM}(s) = \frac{k_{BM}}{T_{BM} \cdot s + 1}, \quad (3.13)$$

$$k_{BM} = \frac{\omega_H}{f}; \quad (3.14)$$

$$T_{BM} = \frac{J_{зв}}{\beta}, \quad (3.15)$$

де  $J_{зв}$  - зведений момент інерції електродвигуна та робочої машини (в даному випадку – вентилятора);

$\beta$  - жорсткість механічної характеристики;

$$\beta = \frac{2 \cdot M_{KP}}{\omega_0 \cdot s_{KP}}, \quad (3.16)$$

де  $M_{KP}$  - критичний момент електродвигуна;

$s_{KP}$  - критичне ковзання електродвигуна.

Розрахуємо необхідні величини для визначення передатної функції за виразами (3.13)–(3.16). Вихідні дані – каталожні значення для електродвигуна АИР100S4У3, технічні характеристики наведені в табл. 5.1 магістерської роботи.

$$M_H = 9550 \cdot \frac{P_H}{n_H} = 9550 \cdot \frac{3}{1410} = 20,32 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (3.17)$$

$$M_{KP} = M_H \cdot \mu_{KP} = 20,32 \cdot 1,6 = 32,51 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (3.18)$$

$$s_H = \frac{n_0 - n_H}{n_0} = \frac{1500 - 1410}{1500} = 0,06. \quad (3.19)$$

$$\mu_1 = \frac{\mu_{KP}}{\mu_{ПВСК}} = \frac{1,6}{1,4} = 1,14. \quad (3.20)$$

$$S_{KP} = \frac{S_H + \sqrt{S_H \cdot \frac{\mu_{KP} - 1}{\mu_1 - 1}}}{1 + \sqrt{S_H \cdot \frac{\mu_{KP} - 1}{\mu_1 - 1}}} = \frac{0,06 + \sqrt{0,06 \cdot \frac{1,6 - 1}{1,14 - 1}}}{1 + \sqrt{0,06 \cdot \frac{1,6 - 1}{1,14 - 1}}} = 0,35 \quad (3.21)$$

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_0}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1500}{60} = 157 \text{ рад./с.} \quad (3.22)$$

$$\omega_H = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_H}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1410}{60} = 147,6 \text{ рад./с.} \quad (3.23)$$

$$J_{IP} = J_{DB} + J_{PM} = 0,01 + 0,09 = 0,1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (3.24)$$

Тоді

$$\beta = \frac{2 \cdot M_{KP}}{\omega_0 \cdot S_{KP}} = \frac{2 \cdot 32,51}{157 \cdot 0,35} = 1,18 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{рад./с.}}$$

$$T_{BM} = \frac{J_{зв}}{\beta} = \frac{0,1}{1,18} = 0,085 \text{ с.} \quad k_{BM} = \frac{\omega_H}{f} = \frac{147,6}{50} = 2,95 \frac{\text{рад./с}}{\text{Гц}}$$

Отже, передатна функція електродвигуна АИР100S4У3 при частотному керуванні

$$W_{BM}(s) = \frac{k_{BM}}{T_{BM} \cdot s + 1} = \frac{2,95}{0,085 \cdot s + 1}$$

### 3.2.6 Вибір частотного перетворювача

У системі автоматичного керування шахтною сушаркою вермикуліту як пристрій керування електродвигуном приводу розвантажувального шнеку обрано частотний перетворювач серії Altivar ATV312 виробництва компанії *Schneider Electric* (рис. 3.5).

Промисловий частотний перетворювач Altivar ATV312 входить до лінійки продуктів Altivar Process ATV300 від *Schneider Electric* і призначений для керування обертовим моментом, а також забезпечення плавного запуску й зупинки синхронних і асинхронних трифазних електродвигунів. Перетворювач ATV312 широко застосовується в різних секторах

промисловості та аграрного виробництва, зокрема в нафтовій і газовій галузях, металургії, харчовій промисловості, системах водопостачання й водовідведення, а також у вентиляційних установках.

Ці пристрої оснащені вбудованим модулем для реалізації ПД-регулювання, що дозволяє ефективно керувати параметрами технологічного процесу.

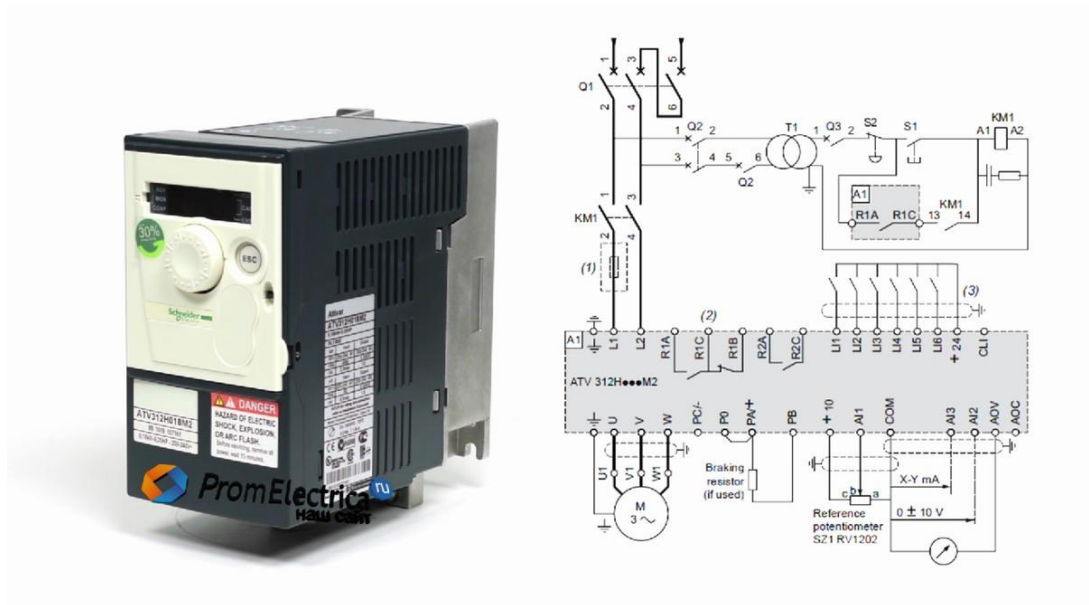


Рис. 3.5 Зовнішній вигляд перетворювача частоти AltivarATV312 фірми SchneiderElectric

Частотні перетворювачі (інвертори) призначені для плавного та безперервного регулювання швидкості обертання трифазних асинхронних електродвигунів. Зміна швидкості досягається шляхом формування на виході трифазного струму з регульованою частотою. Перетворювач забезпечує моніторинг і виведення на цифровий дисплей основних параметрів: заданої швидкості, вихідної частоти, струму та напруги на двигуні, вихідної потужності й крутного моменту, стану дискретних входів, загального часу роботи та інших характеристик.

Технологічні рішення, реалізовані в частотних перетворювачах серії Altivar ATV312, роблять цю серію однією з найбільш передових у своєму

класі. Перетворювачі Altivar ATV312 охоплюють потужність у діапазоні від 0,75 до 75 кВт.

Основні можливості Altivar ATV312:

- діапазон вихідних частот: від 0,2 до 400 Гц;
  - 15 програмованих швидкісних налаштувань;
  - векторне керування із функцією самоналагодження або комбіноване керування (векторне + компенсація ковзання), яке дозволяє досягати не менше 150% номінального моменту двигуна починаючи з частоти 1 Гц;
  - функція оптимізації часу розгону та гальмування;
  - вбудований ПД-регулятор із прямою та зворотною дією, який можна використовувати, наприклад, для контролю температури, тиску або витрати;
  - два режими зупинки двигуна: контрольоване гальмування або вільне зупинення (вибіг);
  - функція автоматичного повторного запуску після зникнення живлення з можливістю пуску навіть на обертовий двигун;
  - інтегрований інтерфейс RS-485 для підключення до ПК, з максимальною швидкістю передачі даних до 19500 бод;
- розширені функції захисту для двигуна або їх груп:
- вимкнення при перевищенні допустимого моменту;
  - захист від перевантажень, перекосів і обривів фаз;
  - захист від перегрівання;
  - захист від короткого замикання.

Також у частотний перетворювач вбудована енергозберігаюча функція "Stop&Go", яка дозволяє знизити енергоспоживання в режимі очікування до 60%.

Частотний перетворювач Altivar ATV312 не лише забезпечує вимірювання обсягу спожитої електроенергії з точністю до 5%, але й дозволяє контролювати відхилення споживання енергії від заданих (номінальних)

значень [24]. При цьому розрахунок енергоспоживання виконується без використання додаткових вимірювальних пристроїв і в тих одиницях, які задає користувач.

Інтегрований порт Ethernet забезпечує оперативний доступ до параметрів налаштування та конфігурації пристрою Altivar ATV312.

Потужність частотного перетворювача, а також кількість необхідних пристроїв для забезпечення живлення всіх електродвигунів приводів вентиляторів, визначено у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4.

Технічні характеристики моделей перетворювачів частоти типу AltivarATV312 фірми SchneiderElectric

Номер за каталогом	Потужність, кВт	Струм в усталеному режимі, А	Перевантаження за струмом, 60 сек., А	Габарити, ВхШхГ	Маса, кг
ATV312H U075N4	0,75	2,2	2,4	143x107x150	2,2
ATV312H U15N4	1,50	3,7	4	143x107x150	2,2
ATV312H U22N4	2,20	5,1	5,6	143x107x150	2,2
ATV312H U30N4	3	7,2	7,9	184x142x150	3,350
ATV312H U40N4	4	9,1	10	184x142x150	3,350
ATV312H U55N4	5,5	12	13,2	184x142x150	3,350
ATV312H U75N4	7,5	16	17,6	232x180x170	6,450
ATV312H D11N4	11	22,5	24,8	232x180x170	6,450
ATV312H D15N4	15	30,5	33,6	232x180x170	1,650
ATV312H D18N4	18,5	37	40,7	330x245x190	1,650
ATV312H D22N4	22	43,5	47,9	330x245x190	2,6400

Оскільки для приводу розвантажувального шнеку використовується асинхронний трифазний електродвигун АИР100S4У3 потужністю 3,0 кВт,

згідно з табл. 3.4 необхідно використати частотний перетворювач AltivarATV312HU30N4.

#### 4 РОЗРОБКА ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

На сучасному етапі розвитку систем автоматизації провідну роль відіграють цифрові регулятори. Для визначення параметрів їх налаштування зазвичай застосовують аналітичні або графічні методи, базуючись на імпульсній теоремі. Однак у випадках, коли необхідно досліджувати процеси, що відбуваються безпосередньо всередині цифрового регулятора, розробляти власний програмний алгоритм керування або оцінювати вплив дискретизації сигналів і періоду квантування на динаміку системи, доцільніше застосовувати метод синтезу регулятора із використанням Z-перетворення [13,14].

У цьому розділі розглядається підхід до визначення параметрів ПД-регулятора, що базується на апроксимації неперервної частини системи другого порядку у вигляді послідовного з'єднання двох інерційних ланок:

$$W_{ин}(s) = \frac{K}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}. \quad (4.1)$$

Передатна функція цифрового ПД-регулятора має вигляд:

$$W_{pp}(z) = K_p + \frac{K_i T(z+1)}{2(z-1)} + \frac{K_d(z-1)}{Tz} = \frac{K_i T^2 + 2K_d + 2K_p T}{2Tz(z-1)} \left( z^2 + \frac{K_i T^2 - 2K_p T - 4K_d}{K_i T^2 + 2K_d + 2K_p T} z + \frac{2K_d}{K_i T^2 + 2K_d + 2K_p T} \right) \quad (4.2)$$

Якщо в знаменнику неперервної частини є два полюси  $z_1$  і  $z_2$ , то знаменник має поліном другого степеня  $z^2 - (z_1 + z_2)z + z_1 z_2$ . Синтез цифрового ПД-регулятора полягає у підборі параметрів налаштування  $K_p$ ,  $K_i$  та  $K_d$ , які забезпечують компенсацію двох полюсів Z-перетворення, що відповідають інерційним ланкам другого порядку в неперервній частині системи. У результаті формується система з двох рівнянь, яка містить три невідомі параметри регулятора:

$$\begin{cases} \frac{K_i T^2 - 2K_p T - 4K_d}{K_i T^2 + 2K_d + 2K_p T} = -(z_1 + z_2) = d \\ \frac{2K_d}{K_i T^2 + 2K_d + 2K_p T} = z_1 z_2 = c \end{cases} \quad (4.3)$$

Оскільки рівняння (4.2) та (4.3) мають зайву змінну, то один з параметрів слід визначати за додатковими технологічними умовами. Наприклад, коефіцієнт

інтегральної складової регулятора рекомендується визначати за добротністю за швидкістю  $K_V$ , яка визначається як величина, обернена коефіцієнту похибки за швидкістю  $C_1$  при поданні динамічної похибки  $\Delta x(t)$  у вигляді нескінченного ряду

$$\Delta x(t) = C_0 \cdot x_{ex}(t) + C_1 \cdot \frac{dx_{ex}(t)}{dt} + \frac{C_2}{2!} \cdot \frac{d^2 x_{ex}(t)}{dt^2} + \dots \quad (4.4)$$

Для астатичної системи добротність за швидкістю можна визначити як відношення швидкості зміни вхідного сигналу  $\frac{dx_{ex}(t)}{dt} = \dot{x}_{ex}$  до усталеної похибки

$$K_V = \frac{\dot{x}_{ex}}{\Delta x_{уст}} \quad (4.5)$$

при лінійній зміні вхідного сигналу  $x_{ex}(t) = kt$ . Тоді швидкість  $\dot{x}_{ex} = const = k$ , а Z-зображення вхідного сигналу  $X_{ex}(z) = \frac{kTz}{(z-1)^2}$ .

Зображення динамічної похибки матиме вигляд:

$$\Delta X(z) = \frac{X_{ex}(z)}{1 + W_{роз}(z)} = \frac{X_{ex}(z)}{1 + W_{pez}(z)W_{нч}(z)} \quad (4.6)$$

Згідно з теоремою про кінцеве значення Z-перетворення усталена похибка буде дорівнювати:

$$\begin{aligned} \Delta x_{уст} &= \lim_{z \rightarrow 1} \frac{z-1}{z} \Delta X(z) = \lim_{z \rightarrow 1} \frac{z-1}{z} \frac{X_{ex}(z)}{1 + W_{pez}(z)W_{нч}(z)} = \\ &= \lim_{z \rightarrow 1} \frac{z-1}{z} \frac{\frac{kTz}{(z-1)^2}}{1 + W_{pez}(z)W_{нч}(z)} = \frac{kT}{\lim_{z \rightarrow 1} [(z-1)(1 + W_{pez}(z)W_{нч}(z))]} = \\ &= \frac{kT}{\lim_{z \rightarrow 1} [(z-1) \cdot W_{pez}(z)W_{нч}(z)]}. \end{aligned} \quad (4.7)$$

Враховуючи, що  $\dot{x}_{ex} = k$ , отримаємо:

$$\Delta x_{уст} = \frac{\dot{x}_{ex}}{\frac{1}{T} \lim_{z \rightarrow 1} [(z-1) \cdot W_{pez}(z)W_{нч}(z)]}. \quad (4.8)$$

Тоді для систем з ПД-регулятором:

$$K_V = \frac{\dot{x}_{ex}}{\Delta x_{ycm}} = \frac{1}{T} \lim_{z \rightarrow 1} [(z-1) \cdot W_{pez}(z) W_{нч}(z)] = \quad (4.9)$$

$$= \frac{1}{T} \lim_{z \rightarrow 1} \left[ \left( (z-1) K_p + (z-1) \frac{K_i T (z+1)}{2(z-1)} + (z-1) \frac{K_d (z-1)}{z} \right) W_{нч}(z) \right].$$

Остаточно, добротність за швидкістю для систем з ПД- регулятором

$$K_V = \lim_{z \rightarrow 1} W_{нч}(z) \cdot K_i. \quad (4.10)$$

При цьому похибка слідкування при лінійній зміні вхідного сигналу  $x_{ex}(t) = kt$  буде дорівнювати:

$$\Delta x_{ycm} = \varepsilon_{tr} = \frac{k}{K_V} \quad (4.11)$$

Коефіцієнт інтегруючої складової регулятора тоді визначається:

$$K_i = \frac{K_V}{\lim_{z \rightarrow 1} W_{нч}(z)} \quad (4.12)$$

Рекомендовані значення коефіцієнта добротності за швидкістю залежать від постійних часу об'єкту (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 Залежність коефіцієнту добротності за швидкістю від постійних часу об'єкта

Постійні часу об'єкту $T$ , с	Коефіцієнт добротності за швидкістю $K_V$
$\approx 1$	3..10
$\approx 10$	0,3..1
$\approx 100$	0,01..0,04
$\approx 1000$	0,004..0,012

У подальших розрахунках нехтуємо інерційною складовою передатної функції електродвигуна, оскільки постійна часу є дуже малою (0,085 с).

Виконується визначення передатної функції для розімкненої, замкненої та дискретизованої моделей неперервної частини системи, яка включає фіксатор нульового порядку. Для цього використовується математичне програмне забезпечення MATLAB. Передатні функції окремих елементів системи автоматичного керування (САК) наведено нижче:

$$W_{пвп}(s) = \frac{0,089}{8 \cdot s + 1}.$$

$$W_{BM}(s) = \frac{2,95}{0,085 \cdot s + 1}.$$

$$W_{OV}(s) = \frac{0,39 \cdot e^{-40 \cdot s}}{1610 \cdot s + 1}.$$

Передатна функція розімкненої неперервної частини

$$W_{PO3}(s) = \frac{0,089 \cdot 2,95 \cdot 0,39}{(8 \cdot s + 1) \cdot (0,085 \cdot s + 1) \cdot (1610 \cdot s + 1)} = \frac{0,102}{(8 \cdot s + 1) \cdot (0,085 \cdot s + 1) \cdot (1610 \cdot s + 1)}.$$

Передатна функція замкненої неперервної частини

$$W_{3AM}(s) = \frac{W_{PO3}(s)}{1 + W_{PO3}(s)} = \frac{\frac{0,102}{(8 \cdot s + 1) \cdot (0,085 \cdot s + 1) \cdot (1610 \cdot s + 1)}}{1 + \frac{0,102}{(8 \cdot s + 1) \cdot (0,085 \cdot s + 1) \cdot (1610 \cdot s + 1)}}.$$

$$W_{3AM}(s) = \frac{0,102}{1094,8s^3 + 13017s^2 + 1618,085s + 1,102}$$

Згідно з теоремою Котельникова, для забезпечення точного відтворення сигналу, як свідчить аналіз амплітудних спектрів імпульсної системи, мінімальна допустима частота дискретизації повинна бути не меншою за  $2 \cdot \omega_c$ , де  $\omega_c$  – максимальна частота вхідного сигналу, що присутня в амплітудно-частотній характеристиці неперервної частини системи.

Теорема стверджує: якщо сигнал не містить в собі частот вище, ніж  $\omega_c$ , рад/с, він повністю описується своїми значеннями, виміряними у дискретні моменти часу з інтервалом

$$T_{ц} \leq \frac{\pi}{\omega_c} \quad (4.13)$$

При заданій точності відтворення сигналу можна вважати, що спектр сигналу

$$|W_{3,НЧ}(j \cdot \omega)| \leq \theta_{зад}, \quad (4.14)$$

де  $|W_{3,НЧ}(j \cdot \omega)|$  – амплітудно-частотна характеристика неперервної частини замкненої автоматичної системи;

$\theta_{\text{зад}}$  – необхідна точність, що повинна бути забезпечена на виході системи.

Будуємо АЧХ замкненої неперервної частини (рис. 4.1) системи та визначаємо час квантування(за допомогою математичного пакету MATLAB).

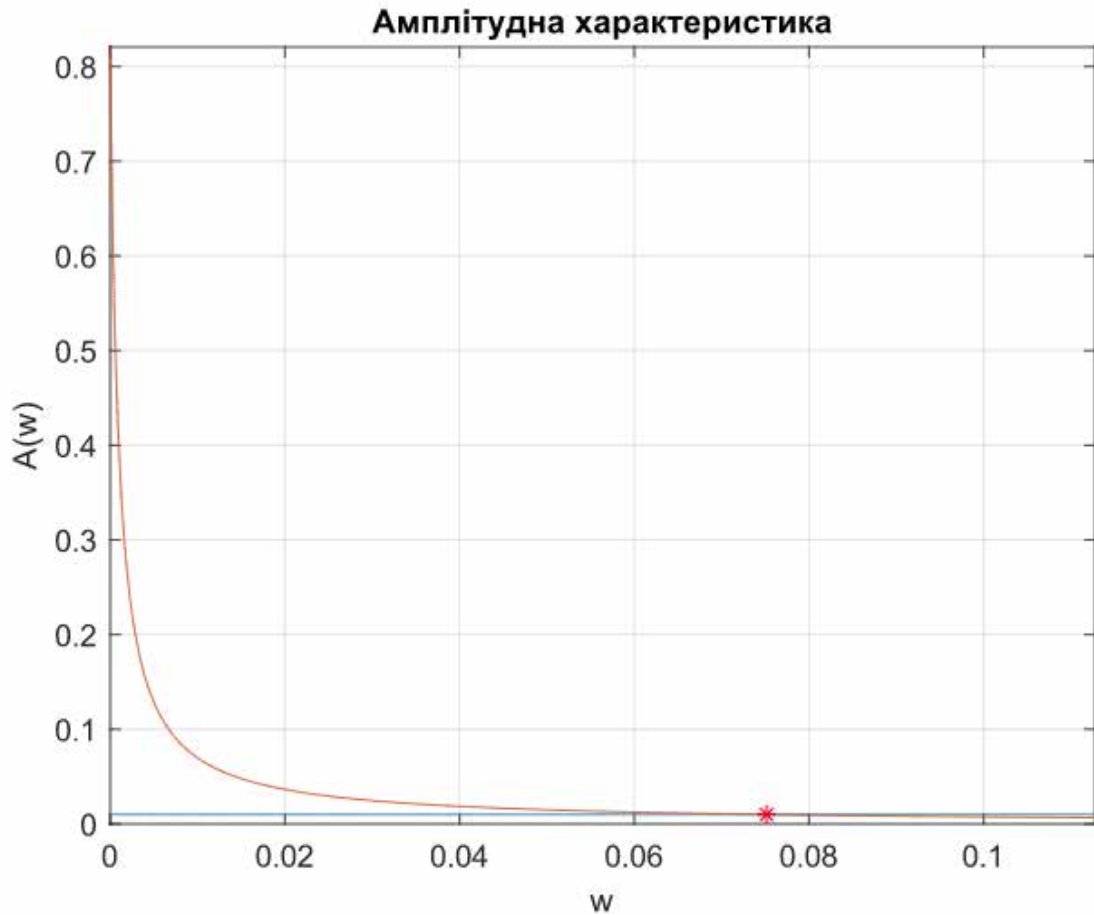


Рис. 4.1 АЧХ замкненої неперервної частини САК

```

Розрахункова частота квантування
ws =
    0.0752
Розрахунковий період квантування
Tk =
    41.8041

```

```

Дискретна передатна функція розімкнутої неперервної частини
Wncz =
  0.0313 z + 1.032e-05
  -----
          z^2 - 0.9686 z
Sample time: 41.804 seconds
Discrete-time transfer function.
Корені характеристичного рівняння
Zk =
      0
    0.9686
Корені характеристичного рівняння
a1 =
1312.0
Корені характеристичного рівняння
b1 =
      0
Коефіцієнт помилки системи за швидкістю
C1 =
328.0

Коефіцієнт добротності системи за швидкістю
Kv =
0.0030487499748373009139939993823708
Інтегральний параметр складової ПІД-регулятора
Ki =
0.0030537
Пропорційний параметр складової ПІД-регулятора
Kp =
    4.0068

Диференціальний параметр складової ПІД-регулятора
Kd =
      0

```

На основі проведених розрахунків для системи автоматичного керування температурою сушіння вермикуліту у шахтній сушарці визначено параметри налаштування ПІД-регулятора.

Для перевірки стійкості цифрової системи керування температурним режимом використано критерій Джурі. Згідно з цим критерієм, усі корені характеристичного рівняння повинні розташовуватись всередині одиничного кола на площині  $z$ , тобто мають задовольняти умову  $|z_k| < 1$  (рис. 4.2), і оскільки усі корені знаходяться у колі – система є стійкою.

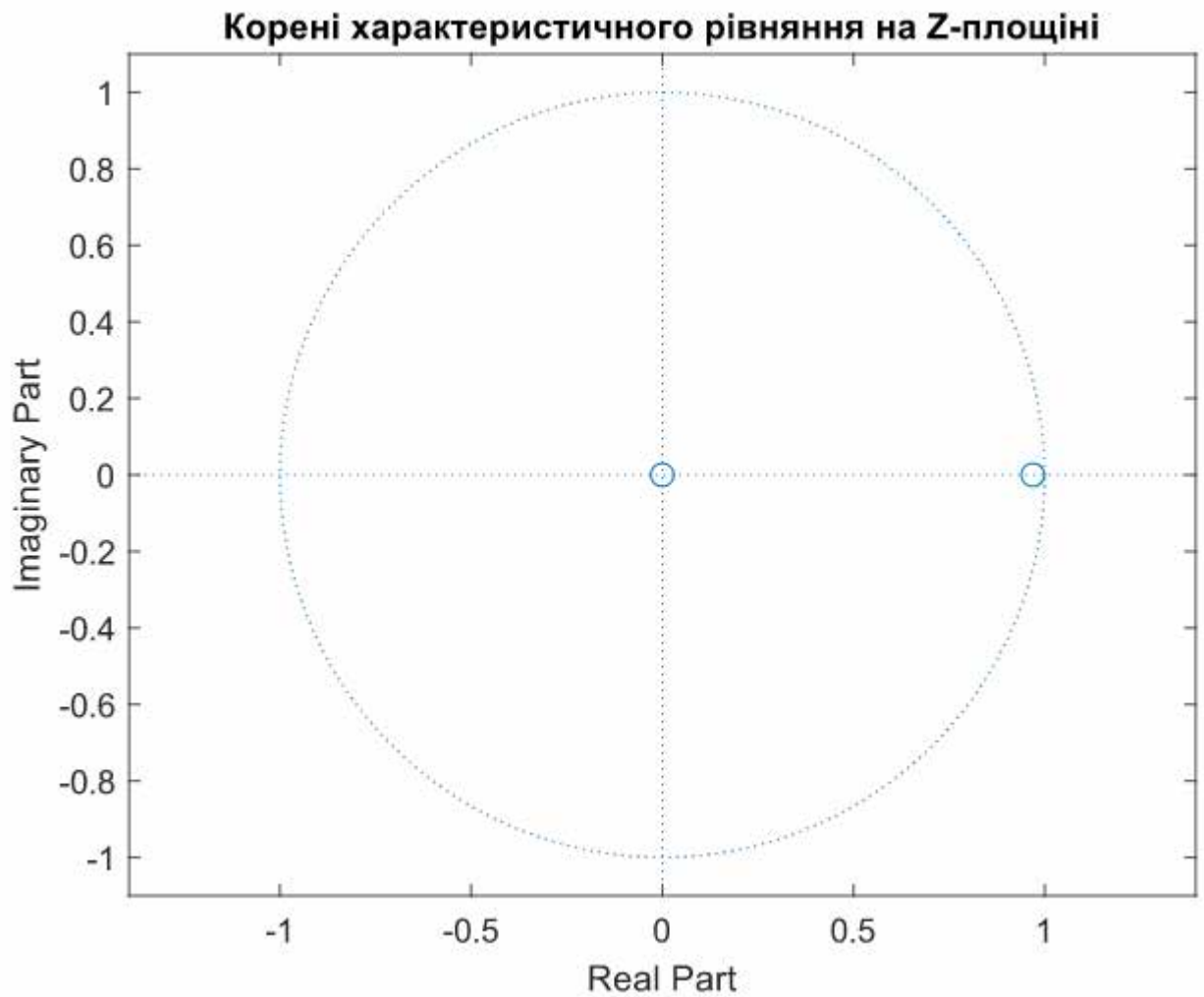


Рис. 4.2 Корені характеристичного рівняння на z-площині

Оцінити показники якості функціонування системи можна шляхом побудови перехідного процесу цифрової системи керування в середовищі MATLAB (рис. 4.3). З аналізу отриманої кривої видно, що час встановлення становить 3000 с, при цьому система не має регуляційної похибки та не демонструє перерегулювання.

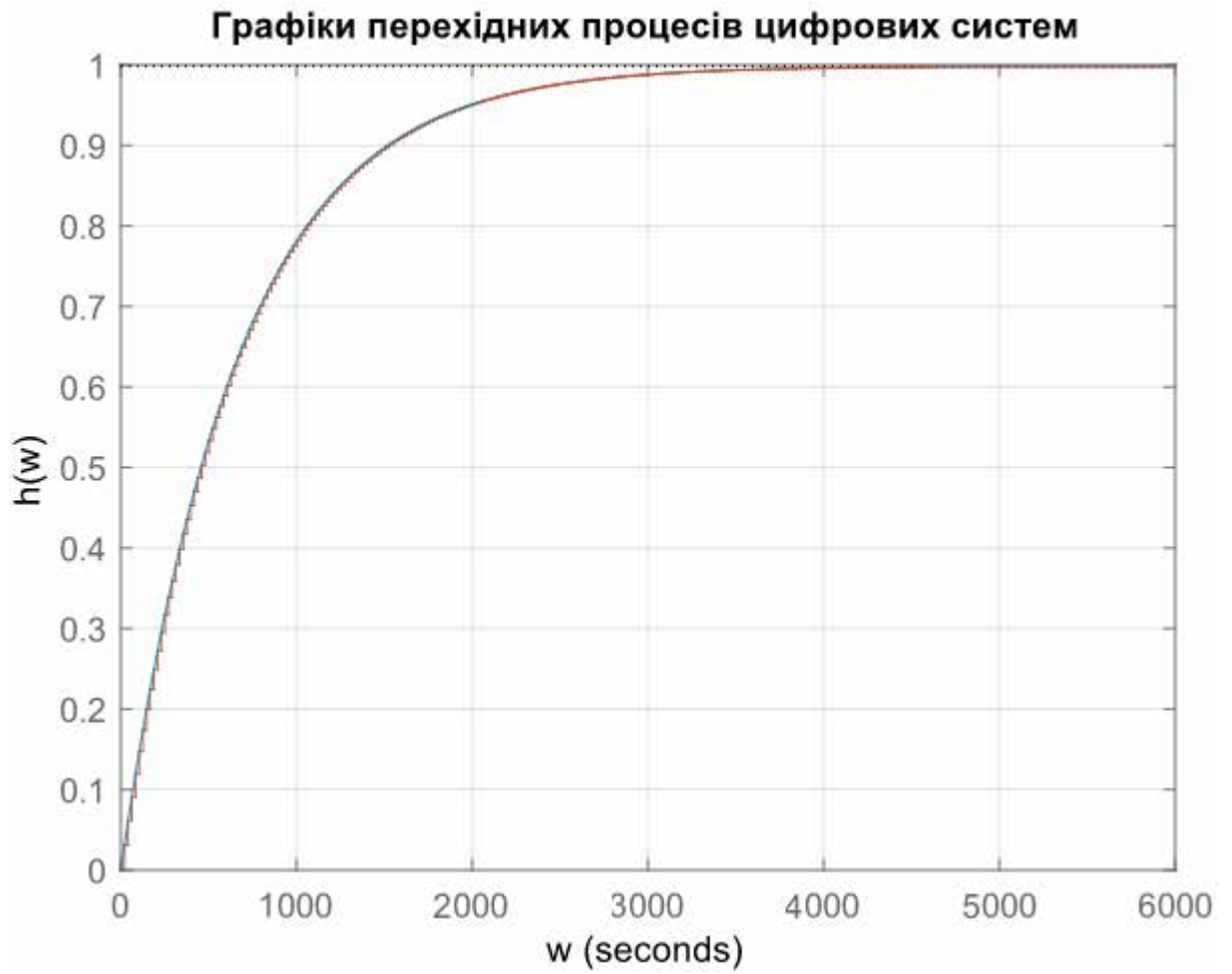


Рис. 4.3 Перехідний процес САК температурним режимом сушіння вермикуліту у шахтній сушарці вермикуліту

## 5 СХЕМИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

### 5.1 Розробка схеми електричної принципової системи автоматичного керування шахтною сушаркою вермикуліту LAWSBC-8LE

Принципова електрична схема системи автоматичного керування шахтною сушаркою вермикуліту LAWSBC-8LE представлена на аркуші 2 графічної частини кваліфікаційного проєкту. Система реалізована з використанням обладнання фірми ОВЕН, зокрема:

- програмованого логічного контролера ПЛК73 (D1.1);
- модулів розширення аналогових входів ОВЕН МВ110-224.8А (D1.4, D1.5);
- релейних модулів виходів ОВЕН МУ110-224.6У (D1.12);
- частотного перетворювача ATV312HU30N4 (U1) виробництва Schneider

Electric.

Система підтримує два режими роботи – ручний та автоматичний[10].

Алгоритм роботи системи:

1. Усі автоматичні вимикачі QF1...QF7 переводяться у положення «ввімкнено».
2. За допомогою кнопки "Пуск" (SB2.1) активується запуск програми в ПЛК D1.1.
3. При встановленні перемикача SA1 у положення «Автоматичний», натисканням кнопки SB3 розпочинається вентилявання шахти атмосферним повітрям. Вмикаються електродвигуни M1 і M2, які забезпечують подачу сушильного агента у відповідні зони шахти. Тривалість цього етапу становить 10 хвилин.
4. Після завершення вентилявання, за сигналом з ПЛК та за допомогою реле KL4, запускається електродвигун M4, що приводить у дію норію завантаження вермикуліту у надсушильний бункер. Коли об'єм вермикуліту досягає верхнього рівня (фіксується датчиком D1.2),

розпочинається його подача в сушильну шахту.

5. Паралельно з подачею вермикуліту вмикається теплогенератор, який забезпечує нагрів повітря. Гарячий агент подається до зони нагріву і сушіння шахти.

6. Через 30 хвилин активується електродвигун м3 розвантажувального шнека, який транспортує оброблений вермикуліт до рециркуляційної норії м5.

7. Показники температури сушильного агента та вермикуліту зчитуються контролером з датчиків D1.6–D1.9, а вологість – із датчиків D1.10 та D1.11 через аналогові модулі D1.4 і D1.5.

8. Тривалість теплової обробки регулюється частотою обертання електродвигуна м3, яка змінюється за допомогою частотного перетворювача U1. Чим вища швидкість вивантаження, тим коротший час перебування вермикуліту в зоні сушіння.

9. Після попереднього сушіння матеріал повертається на повторну обробку (рециркуляцію) через норії м5 та м4, до досягнення встановленої вологості, яка контролюється за допомогою датчика D1.11.

10. Коли параметри вологості досягають заданого рівня, привід м5 перемикається на реверс, а норія м6 починає остаточне вивантаження вермикуліту. Норія м4 очищується від залишків протягом 2 хвилин і вмикається. Процес триває до повного вивантаження матеріалу з шахти, що контролюється спрацюванням датчика нижнього рівня D1.3 та витримкою часу на завершення (2 хвилини).

11. Після завершення процесу поетапно зупиняються двигуни м1, м2, м3, а також теплогенератор. Через 2 хвилини припиняють роботу норії м5 та м6.

Сигнальна індикація:

- Лампи HL1–HL8 сигналізують про наявність живлення в ланцюгах керування електродвигунами та САК.
- Лампи HL9–HL16 відображають виконання технологічних етапів обробки вермикуліту.

## 5.2 Вибір апаратури захисту та керування

Згідно з електричною принциповою схемою системи автоматичного керування шахтною сушаркою вермикуліту LAWSBC-8LE, для реалізації функцій запуску, зупинки, керування та електрозахисту використовуються такі технічні засоби:

- Для керування частотним перетворювачем U1, що регулює швидкість обертання валу електродвигуна M3 (привод розвантажувального шнека), від коротких замикань застосовується автоматичний вимикач QF1 і електромагнітний пускач KM1. При цьому функції захисту електродвигуна M3 від перевантаження, перекоосу або обриву фаз, перегріву, коротких замикань і перевищення крутного моменту реалізуються безпосередньо частотним перетворювачем U1.

- Для запуску, зупинки та захисту інших виконавчих механізмів системи, а саме електродвигунів приводу:

- відцентрових вентиляторів (M1, M2),
- норії завантаження вермикуліту (M4),
- норії рециркуляції (M5),
- норії остаточного вивантаження (M6),

— передбачено автоматичні вимикачі з комбінованими (електромагнітним і тепловим) розчіплювачами, а також електромагнітні пускачі, згідно з нумерацією, наведеною у схемі [11]. Це забезпечує захист від коротких замикань і перевантажень у відповідних колах живлення.

- Для захисту кола керування від струмів короткого замикання використовується автоматичний вимикач QF7.

- Окрім перелічених пристроїв, до складу схеми керування входять:
- кнопкові пости керування: SB1, SB2;
- функціональні кнопки SB3–SB8 для виконання різних операцій;
- проміжні реле KL1–KL7;
- перемикач SA1, що задає режим роботи (ручний / автоматичний);

- сигнальні лампи HL1–HL16, які відображають стан живлення і виконання основних технологічних операцій.

Технічні характеристики електродвигунів наведені у табл. 5.1, 5.2.

Таблиця 5.1 Технічні характеристики асинхронних трифазних електродвигунів АИР180М8У3 та АИР132S4У3 приводу відцентрових вентиляторів

Характеристика електродвигуна	Марка електродвигуна та позначення за принциповою схемою	
	3 АИР180М8У (М1)	3 АИР132S4У (М2)
Потужність, кВт	15	7,5
Напруга живлення, В	380/660	220/380, 380/660
Номінальний струм, А	34,1	15,6
Частота обертання поля статора, об/хв.	750	1500
Частота обертання валу, об./хв.	730	1450
cosφ	0,76	0,84
ККД, %	88,0	87,0
Відношення моментів $M_{\text{пуск}}/M_{\text{н}}$	2,0	2,3
Відношення моментів $M_{\text{max}}/M_{\text{н}}$	2,0	2,3
Відношення струмів $I_{\text{пуск}}/I_{\text{н}}$	6,6	7,0
Момент інерції, кг·м <sup>2</sup>	0,1	0,0227
Режим роботи	Тривалий, S1	Тривалий, S1
Термічний клас ізоляції обмоток	F – до 150°C	F – до 150°C
Ступінь захисту від вологи та пилу	IP54	IP54
Вага, кг	172,0	67,0

Таблиця 5.2 Технічні характеристики асинхронних трифазних електродвигунів АИР100S4У3 та АИР100L6У3 приводу розвантажувального шнеку та норій (завантаження та вивантаження)

Характеристика електродвигуна	Марка електродвигуна	
	3 АИР100S4У (М3)	3 АИР100L6У (М4, М5, М6)
Потужність, кВт	3,0	2,2
Напруга живлення, В	3ф,220/380,5 0Гц	3ф,220/380, 50Гц
Номінальний струм, А	6,8	5,6
Частота обертання поля статора,	1500	1000

об/хв.		
Частота обертання валу, об./хв.	1410	935
cosφ	0,82	0,76
ККД, %	82,6	79,0
Відношення моментів $M_{\text{пуск}}/M_{\text{н}}$	2,3	2,0
Відношення моментів $M_{\text{max}}/M_{\text{н}}$	2,3	2,1
Відношення струмів $I_{\text{пуск}}/I_{\text{н}}$	7,0	6,5
Момент інерції, кг·м <sup>2</sup>	0,01	0,02
Режим роботи	Тривалий, S1	Тривалий, S1
Термічний клас ізоляції обмоток	F – до 150°C	F – до 150°C
Ступінь захисту від вологи та пилу	IP54	IP54
Вага, кг	38,0	36,3

### 5.2.1 Вибір автоматичних вимикачів

Під час підбору автоматичного вимикача для ефективного захисту електродвигуна необхідно дотримуватися наступних умов:

- Номінальна напруга автоматичного вимикача повинна бути не меншою за напругу мережі, в якій працює електродвигун:

$$U_{ав} \geq U_{м}; \quad (5.1)$$

- Номінальний струм автоматичного вимикача повинен бути не меншим за номінальний струм електродвигуна, допускається невелике перевищення:

$$I_{ном.ав.} \geq I_{ном.ел.дв}; \quad (5.2)$$

- Номінальні струми теплового та електромагнітного розчіплювачів також повинні відповідати номінальному струму електродвигуна або перевищувати його. При цьому необхідно виконати точне налаштування струму спрацювання теплового розчіплювача відповідно до значення номінального струму електродвигуна:

$$I_{ном.розч.} \geq I_{ном.ел.дв}; \quad (5.3)$$

Таблиця 5.3 Вибір автоматичних вимикачів

Електродвигун	Автоматичний вимикач, виконання умов
АИР100S4У3 (М3) Потужність 3,0 кВт	іК60NC 20А 3Р (трифазний,

Струм $I_n = 6,8A$ Пусковий струм $I_{пуск} = 7 \cdot 6,8 = 47,6A$ $1,6 \cdot I_{пуск} = 76,16A$	електромагнітним розчіплювачем) $U_{ав} = 400B, U_{ав} \geq U_m; 400B > 380B$ $I_{ном.ав} = 20A; I_{ном.ав} \geq I_{ном.ел.дв}; 20A > 6,8A$ $I_{ном.розч} = (5 \dots 10) I_{ном.ав} = (100 \dots 200)A$ $I_{ном.розч} \geq I_{ном.ел.дв}; (100 \dots 200)A > 6,8A$ $I_{від.розч} \geq (1,5 \dots 1,6) I_{пуск}$ $(100 \dots 200)A > 76,16A$
АИР180М8У3 (М1) Потужність 15,0 кВт Струм $I_n = 34,1A$ Пусковий струм $I_{пуск} = 6,6 \cdot 34,1 = 225,06A$ $1,6 \cdot I_{пуск} = 360,1A$	GV2ME36 (трифазний, з електромагнітним та тепловим розчіплювачами) $U_{ав} = 690B, U_{ав} \geq U_m; 690B > 380B$ $I_{ном.ав} = 36A; I_{ном.ав} \geq I_{ном.ел.дв}; 36A > 34,1A$ $I_{ном.розч} = 416A, I_{ном.розч} \geq I_{ном.ел.дв}; 416A > 34,1A$ $I_{від.розч} \geq (1,5 \dots 1,6) I_{пуск}, 416A > 360,1A$ Регулювання захисту теплових розчіплювачів 28...36A

• струм відсічки електромагнітного розчіплювача має становити не менш як 1,5...1,6 від пускового струму електродвигуна:

$$I_{від.розч} \geq (1,5 \dots 1,6) I_{пуск}; \quad (5.4)$$

За вказаними умовами для відповідних електродвигунів були вибрані наступні автоматичні вимикачі (табл. 5.3).

Таблиця 5.3 Вибір автоматичних вимикачів (продовження)

Електродвигун	Автоматичний вимикач, виконання умов
АИР132S4У3 (М2) Потужність 7,5 кВт Струм $I_n = 15,6A$ Пусковий струм $I_{пуск} = 7 \cdot 15,6 = 109,2A$ $1,6 \cdot I_{пуск} = 174,7A$	GV2ME21 (трифазний, з електромагнітним та тепловим розчіплювачами) $U_{ав} = 690B, U_{ав} \geq U_m; 690B > 380B$ $I_{ном.ав} = 23A; I_{ном.ав} \geq I_{ном.ел.дв}; 23A > 15,6A$ $I_{ном.розч} = 327A, I_{ном.розч} \geq I_{ном.ел.дв}; 327A > 15,6A$ $I_{від.розч} \geq (1,5 \dots 1,6) I_{пуск}, 327A > 174,7A$ Регулювання захисту теплових розчіплювачів 17...23A
АИР100L6У3 (М4, М5, М6) Потужність 2,2 кВт Струм $I_n = 5,6A$ Пусковий струм $I_{пуск} = 6,5 \cdot 5,6 = 36,4A$ $1,6 \cdot I_{пуск} = 58,24A$	GV2ME10 (трифазний, з електромагнітним та тепловим розчіплювачами) $U_{ав} = 690B, U_{ав} \geq U_m; 690B > 380B$ $I_{ном.ав} = 6,3A; I_{ном.ав} \geq I_{ном.ел.дв}; 6,3A > 5,6A$ $I_{ном.розч} = 78A, I_{ном.розч} \geq I_{ном.ел.дв}; 78A > 5,6A$ $I_{від.розч} \geq (1,5 \dots 1,6) I_{пуск}, 78A > 58,24A$ Регулювання захисту

Під час вибору автоматичного вимикача, що забезпечує захист програмованого логічного контролера (ПЛК) та кола керування, слід дотримуватись наступних вимог:

- Номінальна напруга вимикача повинна бути не меншою за напругу живлення мережі

$$U_{H.AB} \geq U_{Ж}; \quad (5.5)$$

- Номінальний струм вимикача має дорівнювати або перевищувати робочий струм ПЛК та кола керування

$$I_{H.AB} > I_{K.KEP}, \quad (5.6)$$

- Струм електромагнітного розчіплювача також має відповідати або перевищувати номінальний струм споживання керованої частини системи

$$I_{H.ROZCH} > I_{K.KEP}; \quad (5.7)$$

- Струм відсічки для електромагнітного розчіплювача повинен складати не менше ніж 1,5...1,6 від робочого струму системи керування

$$I_{ВДС.РОЗЧ} > (1,5...1,6) \cdot I_{K.KEP}. \quad (5.8)$$

На підставі електричної принципової схеми, автоматичний вимикач QF7 захищає блок живлення G (модель Hager ST312, 230/24 В, з номінальним струмом споживання 1,04 А) та проміжні реле KL1–KL7. Згідно з характеристиками, реле типу MY4-NS 24VDC мають напругу живлення 24 В постійного струму та споживану потужність 0,9 Вт, тобто струмом споживання  $0,9/24 = 0,0375$  А, із загальним струмом споживання  $7 \cdot 0,0375 = 0,26$  А). Тому приймаємо, що струм споживання кола керування дорівнює  $1,04 + 0,26 = 1,3$  А. Для захисту цього кола обрано автоматичний вимикач іК60NC номіналом 2 А, двополюсний, із струмом спрацьовування електромагнітного розчіплювача в межах  $(5...10) \times I_{ном}$ . Умова (5.8) виконується, оскільки:

$$I_{ВДС.РОЗЧ} > (1,5...1,6) \cdot I_{K.KEP}$$

$$(5 \dots 10) \cdot 2 > (1,5 \dots 1,6) \cdot 1,3A; \quad 10 \dots 20A > 1,95 \dots 2,08A.$$

### 5.2.2 Вибір електромагнітних пускачів

Вибір електромагнітних пускачів для системи автоматичного керування сушаркою вермикуліту здійснюється з урахуванням наступних технічних умов:

- номінальна напруга пускача повинна бути не нижчою за напругу електромережі живлення або перевищувати її

$$U_{H.EП} \geq U_{ж}; \quad (5.9)$$

- номінальний струм, який можуть комутувати силові контакти пускача, має відповідати або перевищувати струм, споживаний відповідною групою електродвигунів

$$I_{H.EП} \geq I_H; \quad (5.10)$$

- напруга живлення котушки пускача повинна збігатися з напругою у колі керування

$$U_{H.КОТ} \geq U_{КЕР}. \quad (5.11)$$

- також враховується відповідність номінального струму теплового реле й струму його неспрацювання (у разі наявності теплового захисту у складі пускача).

Додатково необхідно передбачити наявність допоміжних контактів пускача для включення у схему керування.

На підставі наведених вимог, для електроприводів сушарки вермикуліту були обрані відповідні типи електромагнітних пускачів, перелік яких наведено в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 Вибір електромагнітних пускачів

Електродвигун	Електромагнітний пускач,
АИР100S4У3 (М3) Потужність 3,0 кВт Струм $I_n = 6,8A$	LC1D12M7 (трифазний, з 1NO+1NC допоміжними контактами) $U_{H.EП} \leq 690V, 25...400Гц, 300V$ пост.стр. $U_{H.EП} \geq U_{ж}; 690V > 380V$ $I_{H.EП} = 12A; I_{H.EП} \geq I_{ном.ел.дв}; 12A > 6,8A$ $U_{H.KOT} \geq U_{KEP}; 690 > 220V$
АИР180M8У3 (М1) Потужність 15,0 кВт Струм $I_n = 34,1A$	LC1D40M7 (трифазний, з 1NO+1NC допоміжними контактами) $U_{H.EП} \leq 690V, 25...400Гц, 300V$ пост.стр. $U_{H.EП} \geq U_{ж}; 690V > 380V$ $I_{H.EП} = 40A; I_{H.EП} \geq I_{ном.ел.дв}; 40A > 34,1A$ $U_{H.KOT} \geq U_{KEP}; 690 > 220V$
АИР132S4У3 (М2) Потужність 7,5 кВт Струм $I_n = 15,6A$	LC1D18M7 (трифазний, з 1NO+1NC допоміжними контактами) $U_{H.EП} \leq 690V, 25...400Гц, 300V$ пост.стр. $U_{H.EП} \geq U_{ж}; 690V > 380V$ $I_{H.EП} = 18A; I_{H.EП} \geq I_{ном.ел.дв}; 18A > 15,6A$ $U_{H.KOT} \geq U_{KEP}; 690 > 220V$

Таблиця 5.4 Вибір електромагнітних пускачів (продовження)

Електродвигун	Електромагнітний пускач,
АИР100L6У3 (М4, М5, М6) Потужність 2,2 кВт Струм $I_n = 5,6A$	LC1D09M7 (трифазний, з 1NO+1NC допоміжними контактами) $U_{H.EП} \leq 690V, 25...400Гц, 300V$ пост.стр. $U_{H.EП} \geq U_{ж}; 690V > 380V$ $I_{H.EП} = 9A; I_{H.EП} \geq I_{ном.ел.дв}; 9A > 5,6A$ $U_{H.KOT} \geq U_{KEP}; 690 > 220V$

### 5.2.3 Вибір проміжних реле

Проміжні реле, що застосовуються в колі керування системи сушіння вермикуліту, підбираються відповідно до наступних критеріїв:

- за напругою живлення, яка повинна відповідати напрузі в колі керування:

$$U_{H.РЕЛЕ} \geq U_{K.УПР}; \quad (5.12)$$

- за максимально допустимим струмом, який можуть комутувати допоміжні контакти, тобто фактичний струм у колі керування не повинен перевищувати номінального значення для реле:

$$I_{H.PELE} \geq I_{K.MIP}; \quad (5.13)$$

- з урахуванням необхідної кількості та типу допоміжних контактів (нормально відкриті, нормально закриті, перемикаючі).

Відповідно до вищенаведених вимог, а також згідно з технічними характеристиками, для даної системи було обрано проміжні реле типу MY4-NS 24VDC. Ці реле працюють від постійної напруги 24 В, мають номінальну напругу комутації 220 В у колі керування, максимальний комутаційний струм 5 А, споживану потужність 0,9 Вт і відповідний споживаний струм  $0,9/24 = 0,0375$  А.

Після остаточного підбору кнопочних постів, елементів керування та сигнальних індикаторів, узагальнена відомість електрообладнання для системи автоматичного керування сушаркою вермикуліту представлена в таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 Відомість електроприладів САК шахтною сушаркою вермикуліту LAWSBC-8LE

Поз нач.	Назва	К ільк.	Примі тки
M1	Електродвигун асинхронний трифазний АИР180М8У3	1	15кВт
M2	Електродвигун асинхронний трифазний АИР132S4У3	1	7,5кВт
M3	Електродвигун асинхронний трифазний АИР100S4У3	1	3,0кВт
-6 M4	Електродвигун асинхронний трифазний АИР100L6У3	3	2,2кВт
1 QF	Вимикач автоматичний iK60NC 20A	1	3п
2 QF	Вимикач автоматичний GV2ME36	1	3п
3 QF	Вимикач автоматичний GV2ME21	1	3п
4-6 QF	Вимикач автоматичний GV2ME10	3	3п

7	QF	Вимикач автоматичний iK60NC 2A	1	2п
	U1	Частотний перетворювач ATV312HU30N4	1	
1	D1.	Модульний програмований логічний контролер ОВЕН ПЛК73	1	
2-3	D1.	Датчик рівня вермикуліту ДПУ-10	2	
4-5	D1.	Модуль розширення аналогових входів ОВЕН МВ110-224.8А	2	
6-9	D1.	Датчик температури (термометр опору) ДТС125 ОВЕН	4	
10-11	D1.	Датчик вологості вермикуліту РСЕ-А-315	2	
12	D1.	Модуль розширення релейних виходів ОВЕН МУ110-224.6У	1	
1	KM	Пускач електромагнітний LC1D12M7	1	1NC+1 NO
2	KM	Пускач електромагнітний LC1D40M7	1	1NC+1 NO
3	KM	Пускач електромагнітний LC1D18M7	1	1NC+1 NO
4-7	KM	Пускач електромагнітний LC1D09M7	4	1NC+1 NO
	G	Блок живлення HagerST312 230/24В	1	
1-7	KL	Реле напруги проміжне MY4-NS 24VDC	7	
1-2	SB	Кнопковий пост "Старт-Стоп" ZB5 AW833743	2	NO, NC
3-8	SB	Кнопка "Старт" ZB5 A333	6	NO
1	SA	Перемикач пакетний K11023NLH	1	3 положення
1-7	HL	Лампа сигнальна A22-RLF-RT 220V	7	червон а
8-16	HL	Лампа сигнальна AD22-22DS 24V	9	зелена
4	R1-	Резистор 2кОм	3	

### 5.3 Вибір проводів та кабелів

Перетин струмопровідної жили кабелю, проводу або шнура визначається з урахуванням допустимого нагрівання під навантаженням, а також необхідної механічної міцності. При розрахунку кількості провідників, які можуть бути прокладені в одній трубі або входити до складу багатожильного кабелю, не враховується нульова жила в чотирипровідній трифазній системі або захисне заземлення.

Площу поперечного перерізу жил обирають, виходячи з допустимого тривалого струму навантаження

$$I_{TR,ДОП} \geq I_{РОЗР}, \quad (5.14)$$

де  $I_{РОЗР}$  - розрахунковий струм ділянки електричної мережі, А.

Для окремих електроприймачів розрахунковим значенням тривалого струму вважається їхній номінальний струм.

У випадку з трифазними асинхронними електродвигунами з короткозамкненим ротором допустимий тривалий струм визначають за наступною формулою

$$I_{РОЗР.ДВ} = \frac{10^3 P_{Н.ДВ}}{\sqrt{3} U_H \eta_H \cos \varphi_H}. \quad (5.15)$$

На основі цієї формули були обчислені тривало допустимі струми для електродвигунів, що застосовуються в системі сушіння вермикуліту:

$$\text{АИР180М8У3 (М1)} \quad I_{РОЗР.ДВ} = \frac{1000 \cdot 15}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,88 \cdot 0,76} = 34,08 \text{ А.}$$

$$\text{АИР132S4У3 (М2)} \quad I_{РОЗР.ДВ} = \frac{1000 \cdot 7,5}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,87 \cdot 0,84} = 15,59 \text{ А.}$$

$$\text{АИР100S4У3 (М3)} \quad I_{РОЗР.ДВ} = \frac{1000 \cdot 3,0}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,826 \cdot 0,82} = 6,73 \text{ А.}$$

$$\text{АИР100L6У3 (М4-6)} \quad I_{РОЗР.ДВ} = \frac{1000 \cdot 2,2}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,79 \cdot 0,76} = 5,57 \text{ А.}$$

Відповідно до умов (5.14) та отриманих значень тривалого струму, для підключення кожного з двигунів разом із пуско-захисною апаратурою було підібрано відповідні кабелі. Повна інформація щодо вибраних типів кабелів наведена у таблиці 5.6. [12].

Таблиця 5.6 Вибір кабелів живлення електродвигунів

Електродвигун	Кабель	Найбільший тривало допустимий струм навантаження, А
АИР180М8У3 (М1) $I_{\text{РОЗР.ДВ}} = 34,08 \text{ А.}$	АВВГ 4х10 (переріз 10 мм <sup>2</sup> ), алюмінієві жили, полівінілхлоридна ізоляція	39
АИР132S4У3 (М2) $I_{\text{РОЗР.ДВ}} = 15,59 \text{ А.}$	АВВГ 4х2,5 (переріз 2,5 мм <sup>2</sup> ), алюмінієві жили, полівінілхлоридна ізоляція	19
АИР100S4У3 (М3) $I_{\text{РОЗР.ДВ}} = 6,73 \text{ А.}$	АВВГ 4х2,5 (переріз 2,5 мм <sup>2</sup> ), алюмінієві жили, полівінілхлоридна ізоляція	19
АИР100L6У3 (М4-6) $I_{\text{РОЗР.ДВ}} = 5,57 \text{ А.}$	АВВГ 4х2,5 (переріз 2,5 мм <sup>2</sup> ), алюмінієві жили, полівінілхлоридна ізоляція	19

Як було вказано у підрозділі 5.2.1, розрахунковий струм у колі керування приймається рівним 1,3 А. Виходячи з цього, для живлення кола керування обрано провід типу ПВ1х0,5 — одножильний мідний провід у полівінілхлоридній ізоляції, з номінальним перерізом жили 0,5 мм<sup>2</sup>, що забезпечує тривало допустимий струм до 11 А, чого цілком достатньо для даного навантаження.

Для підключення температурних і вологісних сенсорів, що використовуються у процесі контролю параметрів сушильного середовища у сушарці вермикуліту, застосовується екранований провід типу МГТФЕ 3х0,12

у фторопластовій ізоляції. Такий провід забезпечує надійний захист сигналів від електромагнітних завад.

Щоб обрати кабель для підведення живлення до шафи автоматичного керування, необхідно скористатися наступною умовою:

$$I_{M.ROЗP.} = K_o \cdot \sum I_{ROЗP.ДВ} + I_{КЕР}, \quad (5.1)$$

де  $K_o$  – коефіцієнт одночасності роботи споживачів електроенергії (приймаємо, що усе обладнання працює одночасно, тому  $K_o = 1$ ).

$$I_{M.ROЗP.} = K_o \cdot \sum I_{ROЗP.ДВ} + I_{КЕР} = 34,08 + 15,59 + 6,73 + 3 \cdot 5,57 + 1,3 = 74,41 \text{ А.}$$

Для живлення шафи керування вибраний кабель АВРГ4х35, з алюмінієвими жилами перерізом  $35\text{мм}^2$ , тривало допустимим струмом 85А.

#### **5.4 Розробка електричних схем з'єднань та підключень системи керування шахтною сушаркою вермикуліту**

Схеми з'єднань складають на основі ряду загальних правил:

- Схема з'єднань розробляється для одного конкретного об'єкта — щита, пульта, статора чи станції керування.
- Усі апарати, прилади та елементи арматури, передбачені в електричній принциповій схемі, повинні бути повністю відображені на схемі з'єднань.
- Необхідно зберегти позиційні позначення пристроїв та засобів автоматизації, а також маркування ділянок кіл, які використовуються у принциповій схемі.

Для оформлення схем з'єднань застосовують три основні методи: адресний, графічний та табличний. Для адресного і графічного варіантів додатково дотримуються таких положень:

- Щит або шафа керування зображуються розгорнутими в одну площину. При цьому показуються лише ті конструктивні елементи, на яких

встановлено прилади та автоматику, із збереженням їх взаємного розміщення.

- Прилади та елементи автоматики умовно позначаються прямокутниками без дотримання масштабу. Над прямокутником зображується коло, розділене рисою: число над рисою – порядковий номер приладу (нумерація ведеться зліва направо та зверху вниз по кожному щиту), під рисою – його позиційне позначення згідно з принциповою схемою. За потреби додається внутрішня схема елемента.

- Якщо в одному ряду встановлено кілька однакових реле, внутрішню схему зображають лише один раз.

- Затискачі виводів зображують у вигляді кіл з маркуванням всередині. Якщо заводське маркування відсутнє — використовують умовні арабські цифри згідно з пояснювальними підписами. Важливо: маркування проводів та позначення затискачів на схемах з'єднань не пов'язані між собою.

- Платам з елементами (резисторами, конденсаторами тощо) надають лише порядковий номер, який зазначається в колі над рисою. Позиційне позначення компонентів розміщують поруч із їх умовним графічним символом.

Найбільш поширеним є адресний спосіб виконання схем з'єднань, який полягає в тому, що замість показу ліній зв'язку між елементами на схемі біля точки приєднання проводу вказується цифрова або буквено-цифрова адреса відповідного апарата чи елемента, з яким потрібно здійснити з'єднання (тобто його позиційне позначення за принциповою схемою або порядковий номер). Це дозволяє уникнути перенавантаження схеми зайвими лініями та полегшує її читання.

Схема електричних з'єднань системи автоматичного керування сушаркою вермикуліту зображена на аркуші 3, а схема електричних підключень — на аркуші 4 графічної частини кваліфікаційної бакалаврської роботи.

## 5.5 Вибір щита керування

Відповідно до вимог нормативної документації, щити та пульти керування призначені для встановлення в закритих приміщеннях за температури навколишнього середовища в межах від  $-30^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$  та відносної вологості повітря не більше 80%. Окрім того, промисловістю випускаються модифікації щитів і пультів спеціального призначення — для експлуатації за умов підвищеної або зниженої температури, підвищеної вологості, дії агресивних середовищ тощо.

Шафові щити використовуються у випадках, коли:

- обладнання розміщується у виробничих зонах з високим рівнем запиленості, вологістю або ризиком механічного впливу на апаратуру та внутрішні з'єднання;
- необхідно розмістити допоміжні елементи (реле, джерела живлення тощо) всередині одного корпусу;
- важливо забезпечити захист персоналу від випадкового дотику до відкритих струмопровідних частин і клем.

З урахуванням габаритів пристроїв, що входять до складу системи автоматичного керування, а також необхідності забезпечення вентиляції для частотного перетворювача, вибір зупинено на компактному шафовому щиті типу ЩШМ (1000×800×350) V4 IP30.

Зовнішній вигляд щита керування представлено на аркуші 4 графічної частини кваліфікаційної бакалаврської роботи

## 6 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

Автоматизація технологічних процесів повинна сприяти зростанню обсягів виробництва, підвищенню ефективності праці (через зменшення трудовитрат), а також зниженню енергоспоживання, собівартості продукції та строків окупності інвестицій.

Узагальнюючим показником ефективності капітальних вкладень в розвиток автоматизації є зведені розрахункові витрати, які враховують річні експлуатаційні витрати і частку капіталовкладень, що припадає на один рік[22,23].

Зведені витрати визначають за виразом:

$$B_{зв} = C + E_H \cdot K, \quad (6.1)$$

де:  $B_{зв}$  – зведені витрати, грн./рік;

$C$  – річні експлуатаційні витрати, грн./рік;

$K$  – капітальні витрати, грн.;

$E_H$  – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень, приймають  $E_H = 0,15$ .

До складу експлуатаційних витрат входять:

- витрати на оплату праці персоналу ( $C_3$ );
- утримання основних засобів виробництва ( $C_v$ );
- оплата електроенергії ( $C_E$ );
- інші прямі витрати ( $C_I$ ).

Витрати на оплату праці персоналу з експлуатації систем автоматизації визначають виходячи з витрат праці і годинних ставок з урахуванням різних додаткових нарахувань та доплат ( $C_3 = 30$  грн./год. з 01.09.2022 р.).

Витрати на утримання основних засобів виробництва  $C_v$  складаються з відрахувань на амортизацію  $C_A$  (визначають у відсотках від балансової вартості обладнання приладів і засобів автоматизації, приймають  $C_A = 14,2\%$ )

та відрахувань на поточний ремонт  $C_{IP}$  (також визначають у відсотках від балансової вартості обладнання приладів і засобів автоматизації, приймають  $C_{IP} = 18\%$ ).

Витрати на електроенергію визначаються за споживаною потужністю приладів і тарифами на електроенергію для виробничих цілей (приймається у розмірі 2,40 грн./кВт·год. за цінами 2022 року):

$$C_E = P_{СП} \cdot \Gamma \cdot 2,40, \quad (6.2)$$

де  $P_{СП}$  – потужність споживачів електроенергії;

$\Gamma$  – кількість годин роботи споживачів на рік.

Інші прямі витрати приймають рівними 1% від загальної суми експлуатаційних витрат:

$$C_I = 0,01 \cdot (C_3 + C_A + C_{IP} + C_E). \quad (6.3)$$

При визначенні капітальних вкладень необхідно враховувати:

- вартість технічних засобів автоматизації ( $K_3$ );
- торгівельно-транспортні та складські витрати ( $K_{TT}$ );
- витрати на монтаж технічних засобів ( $K_M$ );
- витрати на електропроводки ( $K_{IP}$ );
- інші капітальні витрати, пов'язані зі здійсненням автоматизації ( $K_I$ ).

Торгівельно-транспортні та складські витрати зазвичай приймаються рівними 11% від вартості технічних засобів:

$$K_{TT} = 0,11 \cdot K_3. \quad (6.4)$$

При визначенні витрат на монтажні роботи приблизно вважають, що вони складають 15...20% від вартості технічних засобів. Для розрахунку приймемо значення 17%:

$$K_M = 0,17 \cdot K_3. \quad (6.5)$$

Витрати на електропроводки складаються з вартості кабелів (проводів) та вартості їх прокладання [19,20].

Інші капітальні витрати, пов'язані зі здійсненням автоматизації, приймаються у розмірі 2% від вартості технічних засобів автоматизації:

$$K_I = 0,02 \cdot K_3. \quad (6.6)$$

Загальна вартість технічних засобів автоматизації складає

$$K_3 = K_{ТЗА} + K_{П}, \quad (6.7)$$

$K_{ТЗА}$  – вартість технічних засобів автоматики у складі САК, грн.;

$K_{П}$  – вартість плат та провідників, грн.

Вартість технічних засобів автоматизації визначається з кошторису системи керування (таблиця 6.1).

Таблиця 6.1 Загальна вартість технічних засобів автоматизації САК шахтною сушаркою вермикуліту LAWSBC-8LE

№	Назва обладнання	Тип	Кількість	Ціна/шт	Ціна
1	Вимикач автоматичний	iK60N C 20A	1	356	356
2	Вимикач автоматичний	GV2ME32	1	2559	2559
3	Вимикач автоматичний	GV2ME21	1	1259	1259
4	Вимикач автоматичний	GV2ME10	3	1335	4005
5	Вимикач автоматичний	iK60N C 2A	1	608	608
6	Частотний перетворювач	ATV312HU30N4	1	9715	9715
7	Програмований логічний контролер	ОВЕН ПЛК73	1	7954	7954
8	Датчик рівня вермикуліту	ДПУ-10	2	6240	12480
9	Модуль розширення	ОВЕН MB110-224	2	10562	21124
10	Датчик температури	TSM	4	180	720
11	Датчик вологості вермикуліту	PCE-A-315	2	284040	568080
12	Модуль розширення	ОВЕН МУ110-224	1	1506	1506
13	Пускач електромагнітний	LC1D12M7	2	875	1750
14	Пускач електромагнітний	LC1D40M7	1	1500	1500
15	Пускач електромагнітний	LC1D09M7	1	858	858
16	Блок живлення постійного струму	HDR-30-24	1	325,92	325,92
17	Проміжні реле	MY4-NS 24V DC	7	90	630
18	Кнопка "Старт-Стоп"	ZB5 AW833743	2	180	360
19	Кнопка "Старт"	ZB5 A333	6	109	654
20	Перемикач на три положення	K11023NLH	1	1037	1037
21	Лампа сигнальна червона 220 В	A22-RLF-RT	7	238	1666
22	Лампа сигнальна зелена 24 В	AD22-22DS	9	37	333
23	Щит керування	ЩК1	1	2896	2896
24	Клемна збірка		2	290	580
—	Всього				640905,9

Зведені витрати становитимуть

$$V_{ЗВ} = C + E_H \cdot K \quad (6.8)$$

Чистий прибуток, років, можна визначити за виразом

$$Ч = \Delta C_3 + \Delta C_E, \quad (6.9)$$

де  $\Delta C_3$  – прибуток за рахунок економії заробітної плати, грн.;

$\Delta C_E$  – прибуток за рахунок економії електричної енергії, грн.

Термін окупності установки складатиме

$$T_{\text{ОКУП}} = K / Ч \quad (6.10)$$

Коефіцієнт ефективності капітальних вкладень

$$E = 1 / T_{\text{ОКУП}} \quad (6.11)$$

Для розрахунків використаємо наведену вище методику, формули заносимо у табличний редактор EXCEL (таблиця 6.1, 6.2).

Таблиця 6.2 Розрахункова таблиця для знаходження терміну окупності від впровадження САК шахтною сушаркою вермикуліту LAWSBC-8LE

Розрахункові значення	Од.	ідний кое	Значення
Загальна вартість технічних засобів автоматизації			641485,9
Торгівельно-транспортні витрати		0.11	70563,45
Витрати на монтаж технічних засобів		0.17	109052,6
Витрати на прокладення проводок	150	17.67	2650,5
Інші капітальні витрати 2%		0.02	12829,72
Капітальні витрати			836582,2
Відрахування на амортизацію		0.15	125487,3
Витрати на поточний ремонт		0.18	150584,8
Витрати на енергоресурси		1.3	2733,12
Потужність автоматизації	1.46		
Кількість годин роботи	1440		
Витрати на оплату праці персоналу			86400
Кількість персоналу	2		
Ставка оператора	30		
Річні експлуатаційні витрати			365205,2
Зведені витрати		0.15	490692,6
Чистий прибуток			85233,6
Прибуток за рахунок зменшення персоналу			84153,6
Прибуток за рахунок зменшення браку			1080
Економія за рахунок підвищення якості	0.01%		
Термін окупності САК			1,815169

Аналізуючи отримані дані, бачимо, що прибуток складає 85233,6грн., а через 1,8 роки САК шахтною сушаркою вермикуліту повністю окупається і вже працюватиме на чистий прибуток. Тому робимо висновок, що установка економічно ефективна і використовувати її доцільно[16,17,18]

## ВИСНОВКИ

Під час виконання кваліфікаційної бакалаврської роботи було вдосконалено систему автоматизації технологічного процесу сушіння вермикуліту у шахтній сушарці вермикуліту. У результаті дослідження визначено вимоги до побудови системи керування, розроблено функціональну схему автоматизації системи керування шахтною сушаркою вермикуліту та покроковий алгоритм роботи відповідного технологічного обладнання. Обґрунтовано вибір алгоритму керування об'єктом, створено імітаційну модель та проведено аналіз впливу збурень.

Перевірка якості функціонування САК виявила, що система є стійкою, час регулювання складає 3000с, відсутні статична похибка та перерегулювання.

Для реалізації системи автоматичного керування шахтною сушаркою вермикуліту LAWSBC-8LE обґрунтовано вибір сучасних технічних засобів автоматики з використанням програмованого логічного контролера ОВЕН ПЛК73. Розроблено електричні схеми: принципову, схему з'єднань, підключень, а також відповідне програмне забезпечення. Економічні розрахунки підтвердили доцільність упровадження розробленої системи керування шахтною сушаркою вермикуліту LAWSBC-8LE, строк окупності становить 1,8 року.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Автоматизація технологічних процесів сільськогосподарського виробництва / І.І. Мартиненко, Б.Л. Головінський, В.П. Лисенко, О.І. Мартиненко, В.М. Решетюк, за ред. І.І. Мартиненка – К.: Урожай, 1995.- 224с.
2. Гончар В.Ф. Електрообладнання і автоматизація сільсько-господарських агрегатів і установок: Навч. Посібник. / В.Ф. Гончар, Л.П. Тищенко. – К.: Вища школа. Головне вид-во, 1989. – 343 с.
3. Драганов Б.Х., Міщенко А.В., Борхаленко Ю.О. Основи теплотехніки і гідравліки: Навчальний посібник / За ред. Б.Х. Драганова. – К.: Аграрна освіта, 2010. – 495с.
4. Електропривід сільськогосподарських машин, агрегатів та потокових ліній: Підручник / Є.Л. Жулай, Б.В. Зайцев, Ю.М. Лавріненко, О.С. Марченко, Д.Г. Войтюк; За ред. Є.Л. Жулая. – К.: Вища освіта, 2001. – 288 с.: іл.
5. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів / В. Лисенко, Є. Чернушенко, В. Решетюк, В. Мірошник, Н. Заєць, І. Цигульов – К.: Аграр Медіа Груп, 2016. – 476 с.
6. Корчемний М., Федорейко В., Щербань В. Енергозбереження в агропромисловому комплексі. - Тернопіль: Підручники & посібники, 2001. –977с.
7. Ликов А.В. Теорія сушіння. - К.: Урожай, 1988. – 471с.
8. Мартыненко И.И, Головинский Б.Л, Проценко Р.Д, Резниченко Т.Ф. Автоматика и автоматизация производственных процессов. М.:1985.-336с.
9. Мартыненко И.И. Лысенко В.Ф. Проектирование систем автоматизации. 2-е изд. перераб. и доп. -М.: Агропромиздат, 1990 г. - 243 с.
10. Навчальне видання: Методичні вказівки щодо оформлення матеріалів курсової роботи з дисциплін: "Проектування систем автоматизації", "Проектування систем електрифікації, автоматизації та енергопостачання АПК", "Проектування систем електрифікації та автоматизації АПК" / В.П. Лисенко, І.М. Болбот, О.І. Задорожній. – Київ, Видавничий центр НАУ, 2007. – 48 с.
11. Лисенко В.П., Решетюк В.М., Цигульов І.Т. Основи автоматизації: теорія і практика (ч.1). Видання 2-е, перероблене і доповнене. / Лисенко В.П., Решетюк В.М., Цигульов І.Т. – К.: Освіта України, 2013. – 720 с.
12. Регульований електропривід. Теорія. Моделювання: Навчальний посібник / І.М. Голодний, Ю.М. Лавріненко, М.В. Синявський, В.В. Козирський, Л.С. Червінський, В.М. Решетюк, В.В. Савченко; За ред. І.М. Голодного. – 2-е вид., доп. і перероб. – К.: Аграр Медіа Груп, 2012. – 513с.: іл.
13. Кучеренко В.І., Прус І.І. *Автоматизація технологічних процесів та*

- систем.* – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2017. – 432 с.
14. Гребенюк С.М. *Системи автоматичного керування: моделювання в MATLAB/Simulink.* – Київ: Ліра-К, 2021. – 340 с.
  15. Кочерга В.О., Кірсанов С.І. *Основи програмування ПЛК контролерів сімейства ОВЕН.* – Харків: ХНУРЕ, 2019. – 150 с.
  16. Жежеленко І.І., Соловйов С.О. *Сучасні технології керування в сільському господарстві.* – Харків: Факт, 2020. – 288 с.
  17. Наконечний О.М., Фурман П.І. *Енергоефективні системи теплопостачання у аграрному секторі.* – Львів: Техніка, 2022. – 204 с.
  18. Гаврилюк І.В. *Використання вермикуліту в агротехнологіях: огляд сучасних підходів* // Вісник аграрної науки. – №4, 2023. – С. 61–66.
  19. **Вермикуліт — мінерал родючості** // Пропозиція. – 2023. <https://propozitsiya.com/ua/vermikulit-mineral-rodyuchosti>
  20. **Ефективність застосування вермикуліту при вирощуванні розсади овочевих культур** // Овощи и Фрукты. – 2024. <https://www.pro-of.com.ua/efektivnist-zastosuvannya-vermikulitu-pri-viroshhuvanni-rozsadi-ovochevix-kultur>
  21. **Вермикуліт та 101 спосіб його застосування в побуті** // Kotelvdome. – 2024. <https://kotelvdome.com.ua/vermikulit>
  22. **Природний помічник — вермикуліт: що це і як його використовувати** // Revolta. – 2024. <https://revolta.com.ua/domivka/prirodnij-pomichnik-vermikulit-shcho-tse-i-yak-jogo-vikoristovuvati.html>
  23. **Вермикуліт: що це і як його можна використовувати в побуті?** // Zaporizhanka. – 2024. <https://zaporizhanka.com.ua/uk/articles/vermykulit-shho-cze-i-yak-jogo-mozhna-vykorystovuvaty-v-pobuti>
  24. **Вермикуліт спучений** // Vermiculite.com.ua. – 2024. <https://vermiculite.com.ua/produktsiya/vermikulit-spuchenij>
  25. **Вермикуліт: призначення, використання та переваги** // Dim.co.ua. – 2024. <https://dim.co.ua/vermikulit-priznachennya-vikoristannya-ta-perevagi-osnovna-informaciya>

## ДОДАТКИ

## Додаток А

Розрахункові дані для побудови розгінної та нормованої розгінної  
характеристики шахтної сушарки вермикуліту  
для каналу керування температурою сушіння вермикуліту

<i>Час <math>t_i, c</math></i>	<i>Температура <math>T, ^\circ C</math></i>	$y(t_i)$	<i>Час <math>t_i, c</math></i>	<i>Температура <math>T, ^\circ C</math></i>	$y(t_i)$
0	15,000	0	3100	49,653	0,889
100	17,126	0,055	3200	49,980	0,897
200	19,556	0,117	3300	50,286	0,905
300	21,830	0,175	3400	50,572	0,912
400	23,957	0,230	3500	50,839	0,919
500	25,947	0,281	3600	51,090	0,925
600	27,807	0,328	3700	51,324	0,931
700	29,548	0,373	3800	51,542	0,937
800	31,175	0,415	3900	51,747	0,942
900	32,698	0,454	4000	51,938	0,947
1000	34,122	0,490	4100	52,118	0,952
1100	35,453	0,524	4200	52,285	0,956
1200	36,699	0,556	4300	52,442	0,960
1300	37,864	0,586	4400	52,588	0,964
1400	38,954	0,614	4500	52,725	0,967
1500	39,973	0,640	4600	52,853	0,971
1600	40,926	0,665	4700	52,973	0,974
1700	41,818	0,688	4800	53,085	0,977
1800	42,651	0,709	4900	53,190	0,979
1900	43,431	0,729	5000	53,288	0,982
2000	44,161	0,748	5100	53,380	0,984
2100	44,843	0,766	5200	53,466	0,986
2200	45,481	0,782	5300	53,546	0,988
2300	46,078	0,797	5400	53,621	0,990
2400	46,636	0,811	5500	53,691	0,992
2500	47,158	0,825	5600	53,757	0,994
2600	47,647	0,837	5700	53,818	0,995
2700	48,103	0,849	5800	53,876	0,997
2800	48,531	0,860	5900	53,929	0,998
2900	48,930	0,870	6000	53,999	0,999
3000	49,304	0,880	6100	54,000	1,000