

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Виконуючий обов'язки завідувача кафедри
автоматики та робототехнічних систем

ім. акад. І.І. Мартиненка

(назва кафедри)

К.Т.Н., доцент _____ О.О. Опришко

(підпис)

(ПІБ)

" ____ " _____ 2026 р.

Гарант освітньої програми

К.Т.Н., доцент _____

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

А.О. Дудник _____

(ПІБ)

**БАКАЛАВРСЬКА КЛАВІФІКАЦІЙНА РОБОТА
(ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ БАКАЛАВРА)**

на тему **"Розроблення системи автоматичного керування
температурою в шахтній зерносушарці із використанням комплексу
технічних засобів Schneider Electric"**

Спеціальність 174 - "Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка"

Гарант освітньої програми

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

(ПІБ)

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи

К.Т.Н., доцент _____

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Руденський А.А. _____

(П.І.Б.)

Виконав

(підпис)

Мороз І.Г _____

(П.І.Б.)

КИЇВ – 2026

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Виконуючий обов'язки завідувача кафедри

автоматики та робототехнічних систем

ім. акад. І.І. Мартиненка

(назва кафедри)

К.Т.Н., доцент _____ О.О. Опришко

(підпис)

(ПІБ)

" ____ " _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання дипломного проекту бакалавра студенту

Морозу Івану Геннадійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність: 174 - " Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка "

1. Тема дипломного проекту бакалавра: **" Розроблення системи автоматичного керування температурою в шахтній зерносушарці із використанням комплексу технічних засобів Schneider Electric "**

затверджена наказом ректора НУБіП України від 24" 10 2025 р. № 2518"С"

2. Термін подання завершеного проекту на кафедру "31" травня 2026 р.

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. Дослідження технології процесу сушіння зерна.

4.2. Розробка та дослідження математичної моделі процесу сушіння зерна

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 автоматизованої системи керування температурою сушіння зернової маси у шахтній сушарці.
- 5.2. Автоматизована система керування температурою сушіння зерна в шахтній сушарці. Принципова електрична схема.
- 5.3. Автоматизована система керування температурою сушіння зерна в шахтній сушарці. Схема електричних з'єднань.
- 5.4. Автоматизована система керування температурою сушіння зерна в шахтній сушарці. Схема електричних підключень.
- 5.5. Автоматизована система керування температурою сушіння зерна в шахтній сушарці. Загальний вигляд шафи керування.

Дата видачі завдання "07" листопада 2025 року.

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи

(Керівник дипломного проєкту бакалавра)

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання

ЗМІСТ

ВСТУП.	6
РОЗДІЛ 1. ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ЗЕРНА.....	7
1.1 Особливості роботи шахтних зерносушильних установок	7
1.2 Загальна характеристика зерносушарки Sukur T-2420.....	7
1.3 Формування функціональної структури системи автоматизації	8
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ ОБ’ЄКТА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ.	10
2.1 Аналіз динамічних властивостей об’єкта керування.	12
2.2 Створення математичного опису зерносушильної установки.	13
2.3 Отримання передатної функції за каналом регулювання температури продукту	16
РОЗДІЛ 3. ВИБІР ПРИНЦИПУ ТА ЗАКОНУ КЕРУВАННЯ.	19
3.1 Обґрунтування прийнятого алгоритму керування	19
РОЗДІЛ 4. ПІДБІР АПАРАТНИХ ЗАСОБІВ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ. .	20
4.1 Вибір контролера, модулів розширення, панелі оператора та мережевого обладнання.	21
4.2 Підбір виконавчих пристроїв системи керування.	23
4.3 Обґрунтування вибору частотного перетворювача.....	25
4.4 Вибір датчиків і вимірювальних перетворювачів.	26
РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА ЦИФРОВОГО КОНТУРУ КЕРУВАННЯ.....	29
5.1 Проектування цифрової системи автоматичного регулювання.	29
5.2 Оцінка роботи цифрової системи керування.	31
РОЗДІЛ 6. ПРОЄКТУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМ ТА ШАФИ КЕРУВАННЯ.....	32
6.1 Побудова принципової електричної схеми.	33
6.2 Розробка схем з’єднань і підключення обладнання.	34
6.3 Компонування та зовнішній вигляд шафи керування.....	34
6.4 Підбір апаратури пуску та захисту.....	36
6.5 Розрахунок і вибір кабельно-провідникової продукції.....	38
РОЗДІЛ 7. РОЗРОБКА ПРОГРАМНОЇ ЧАСТИНИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.	40
7.1 Створення програми для ПЛК та операторської панелі.	40
7.2 Реалізація програмного забезпечення веб-інтерфейсу.....	43
РОЗДІЛ 8. ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ЗАПРОПОНОВАНОГО ТЕХНІЧНОГО РІШЕННЯ.	47
ВИСНОВОК.....	52

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	54
ДОДАТОК А.....	56
ДОДАТОК Б	57

ВСТУП.

Сьогодні українське сільське господарство потребує нових технологій, щоб працювати краще, економити енергію і давати якісний продукт постійно. Один з найважливіших етапів після збору зерна — це його сушіння. Бо від того, наскільки добре воно висушене, залежить, чи зможемо ми його довго зберігати, чи збереже воно свої властивості, і чи не буде багато відходів, коли його будуть переробляти далі.

Сушарки для зерна споживають багато енергії, і дуже важливо дотримуватися всіх правил їх роботи. Якщо погано стежити за температурою, вологістю чи швидкістю подачі повітря, то зерно може зіпсуватися, паливо піде в надлишок, а сама установка працюватиме гірше. Тому дуже важливо використовувати автоматичні системи керування. Вони швидко реагують на будь-які зміни в процесі і допомагають підтримувати найкращі умови для сушіння.

Сьогодні в комплексах для сушіння зерна вже є автоматичний контроль температури, вологості та кількості повітря, а також спеціальні контролери, які виконують задані програми управління. Однак ці системи не завжди можуть точно все налаштувати або добре пристосуватися до того, як змінюється саме зерно чи умови навколо. До того ж, досі актуальними є питання, як зробити обладнання надійнішим, щоб воно менше споживало енергії, і як покращити програми автоматичного керування.

Тому потрібно й далі розвивати автоматизацію зерносушарок, бо ми хочемо, щоб процес працював ще ефективніше, витрати на його утримання були меншими, а якість продукту — стабільною. Тут дуже допоможе використання сучасних цифрових систем контролю, мікропроцесорної техніки та розумних способів керування.

РОЗДІЛ 1. ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ЗЕРНА.

1.1 Особливості роботи шахтних зерносушильних установок.

Шахтні зерносушарки представляють собою агрегати безперервної дії, призначені для сушіння різноманітних зернових культур. Вони вирізняються простою конструкцією, високою продуктивністю та ефективним тепло- і вологообміном, що зумовлює їх широке використання в агропромисловому комплексі.

Головним конструктивним вузлом такого типу сушарок є вертикальна шахта, через яку просувається зерна маса. Шахта складається з окремих технічних зон: зони нагріву та сушіння, зони охолодження та вузла вивантаження готової продукції.

Процес сушіння досягає шляхом подачі гарячого повітря крізь шар зерна. Сушильний агент надходить через систему спеціалізованих каналів, що забезпечує рівномірний розподіл тепла та ефективне видалення вологи з маси.

Система роботи шахтної зерносушарки розроблена так, щоб верхня секція попередньо підігрівала зерно, середня секція переважно випаровувала вологу, а нижня секція охолоджувала зерно перед вивантаженням.

1.2 Загальна характеристика зерносушарки Sukup T-2420.

Американські зерносушарки виробництва компанії Sukup Manufacturing Company широко використовуються в агропромисловому секторі завдяки поєднанню високої продуктивності, надійності та сучасних енергозберігаючих систем. Конструкція обладнання орієнтована на інтенсивні умови роботи та тривалу експлуатацію в різних кліматичних умовах.

В рамках цієї роботи як приклад сучасного енергоефективного обладнання безперервної дії було обрано зерносушарку Sukup T-2420. Ця модель характеризується високою продуктивністю, надійністю конструкції та економним використанням паливних ресурсів. Крім того, сушарка забезпечує рівномірний розподіл теплового потоку по всій зерновій масі, що позитивно впливає на якість сушіння та зменшує ризик перегріву зерна.

Застосування систем автоматичного керування дозволяє швидко змінювати

методи роботи установки відповідно до технічних вимог процесу сушіння. Це забезпечує стабільність роботи обладнання, підвищує ефективність сушіння та зменшує вплив людського фактора на технічний процес.

Таблиця 1.1

Параметр	Значення
Продуктивність при сушінні пшениці	до 24 т/год
Висота сушарки	11,2 м
Ширина сушарки	4,1 м
Тип сушіння	безперервний
Теплова потужність	950 кВт
Витрата повітря	46000 м³/год



Рис. 1.1 Зовнішній вигляд зерносушарки Sukur T-2420

1.3 Формування функціональної структури системи автоматизації.

Вона дозволяє візуалізувати структуру системи, принципи взаємодії її компонентів, логіку роботи пристроїв автоматизації. На схемі показано контрольно-вимірювальні прилади, виконавчі механізми, технологічне обладнання, трубопроводи та інформаційні зв'язки між ними.

Складання функціональної схеми важливе для отримання всебічного розуміння роботи автоматизованої системи керування, для поглибленого аналізу її функцій, а також для спрощення монтажу, налаштування та обслуговування обладнання. Крім того, схема дозволяє визначити функціональне призначення кожного елемента системи та оцінити правильність використання алгоритмів керування технологічними процесами.

Під час складання функціональної схеми автоматизації використовувалися умовні графічні позначення відповідно до вимог нормативного документа ДСТУ Б А.2.4-16:2008 "Автоматизація технологічних процесів. Умовні зображення пристроїв та приладів автоматизації на схемах" [22]. Відповідно до цього стандарту всі елементи повинні мати стандартизовані позначення для чіткого тлумачення схеми фахівцями з автоматизації.

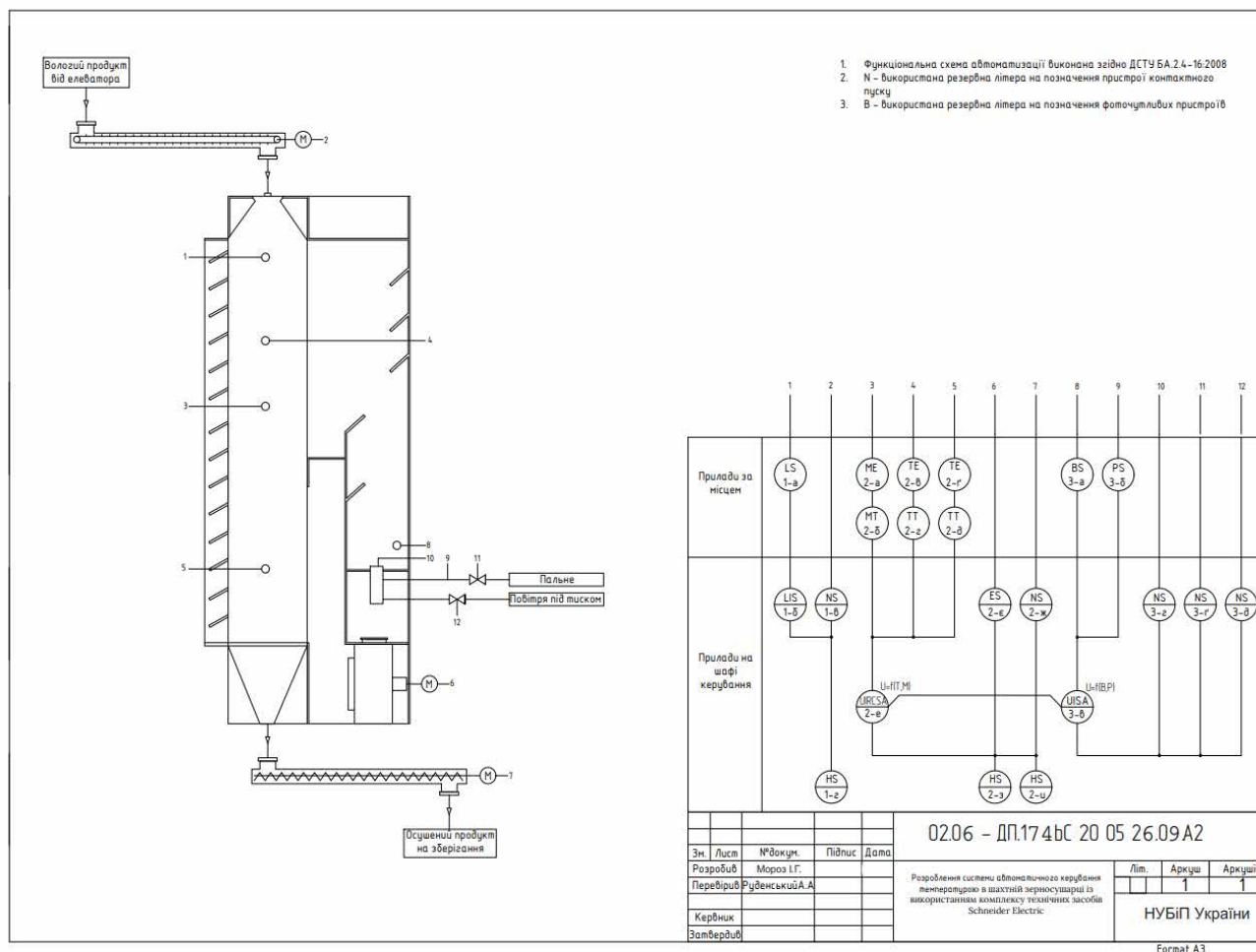


Рис. 1.2 Фрагмент функціональної схеми автоматизації ОК

LS(1-a) – сигналізатор контролю рівня зернової маси у сушильній шахті;
 ME(2-a), MT(2-б) – вимірювач вологості зерна в потоці продукту;
 TE(2-в), TT(2-г) – температурні давачі зернової маси у зоні основного сушіння;
 TE(2-г), TT(2-д) – датчики температури зерна у зоні охолодження та вивантаження;
 BS(3-a) – сенсор контролю наявності полум'я паливкового пристрою;
 PS(3-б) – датчик контролю тиску палива в газовій магістралі; NS(1-в; 2-ж) – магнітні пускачі приводів транспортерів подачі та відвантаження зерна;
 NS(3-г; 3-д; 3-г) – реле системи розпалу, а також виконавчих клапанів подачі повітря і палива;
 ES(2-є) – частотний регулятор електропривода вентилятора;
 HS(1-г; 2-з; 3-и) – кнопкові елементи ручного керування технологічним

процесом.

Автоматизована система керування процесом сушіння зерна складається з трьох основних функціональних контурів:

1. Контур автоматичного підтримання рівня заповнення сушильної шахти зерном;
2. Контур регулювання температурних і вологісних параметрів процесу сушіння;
3. Контур автоматизованого керування роботою газового пальникового обладнання.

РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ.

2.1 Аналіз динамічних властивостей об'єкта керування.

Процес сушіння зернової маси умовно поділяється на два основні етапи. На першому етапі відбувається інтенсивне випаровування вологи з поверхневих шарів матеріалу. Другий етап характеризується видаленням внутрішньо зв'язаної вологи, що переміщується з внутрішніх шарів зерна до його поверхні:

$$P = 5,343124 + 0,27872 * t + 0,032135 * t^2 - 3,40325 * 10^{-4} * t^3 + 7,719212 * 10^{-6} * t^4 \quad (2.1)$$

Отримане співвідношення дає можливість визначити вологовміст пароповітряної суміші, який характеризує масу водяної пари, що припадає на одиницю маси сухого повітря (кг пари/кг сухого повітря):

$$dn = 0,622 * \frac{\varphi * P}{Pb - \varphi * P}, \quad (2.2)$$

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

φ - відносна вологість повітря;

Pb – барометричний тиск парогазової суміші.

Розглянемо процес висушування зерна в статиці, за допомогою матеріальних та енергетичних балансів. Математична модель сушіння, подана у вигляді «чорного ящика» [5] зображена на рис. 2.1.

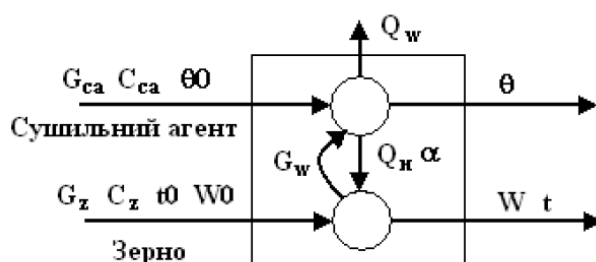


Рис. 2.1 Структурна схема процесу сушіння

В структурній схемі процесу сушіння представлені такі параметри як: G_{ca} , G_z - витрати сушильного агента і зерна, C_{ca} , C_z – теплоємність повітря і зерна, $t0$ і $\theta0$ – початкові значення температури зерна і сушильного агента, t і θ –

температури цих продуктів на виході із сушильної установки, W_0 і W – початковий і кінцевий вологовміст зерна, G_w – волога, яка випарувалася із зерна, Q_n і Q_w – витрати тепла на нагрівання зерна і випарювання води, α – коефіцієнт тепловіддачі від повітря до зерна.

2.2 Створення математичного опису зерносушильної установки.

У рамках симуляційного дослідження технологічного процесу сушіння зерна ми розробимо модель у середовищі Simulink MATLAB. Модель представляє рівняння, що утворюють систему диференціальних рівнянь, та дозволяє розраховувати зміни температури та вологості зернової маси під час процесу сушіння.

Варто створити окрему підсистему для розрахунку допоміжних параметрів. Вона визначає тиск насиченої водяної пари, відносну вологість сушильного агента, баланс вологості зерна та коефіцієнт інтенсивності сушіння.

Як вихідні параметри моделювання ми використовуватимемо дані, що відповідають процесу сушіння харчового зерна, отримані на основі літературних джерел та аналізу засобів контролю.

Витрата зерна, що надходить на сушіння: $G_z = 3,3$ кг/с;

Початкова температура зерна: $t_0 = 15$ °С;

Початковий вологовміст зерна: $W_0 = 0,18$;

Питома теплоємність зерна: $C_z = 2000$ Дж/(кг·°С);

Витрата сушильного агента: $G_{sa} = 4,5$ кг/с;

Температура сушильного агента на вході: $\theta_0 = 90$ °С;

Питома теплоємність сушильного агента: $C_{sa} = 1010$ Дж/(кг·°С);

Питома поверхня зерна: $\sigma = 2,47$ м²/кг[5];

Вологовміст пароповітряної суміші в сушарці: $d_n = 0,006$ кг пари/кг сухого повітря;

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

Барометричний тиск: $P_\beta = 750$ мм рт. ст.;

Коефіцієнт тепловіддачі від сушильного агента до зерна: $\alpha = 15$ Вт/(м²·°С).

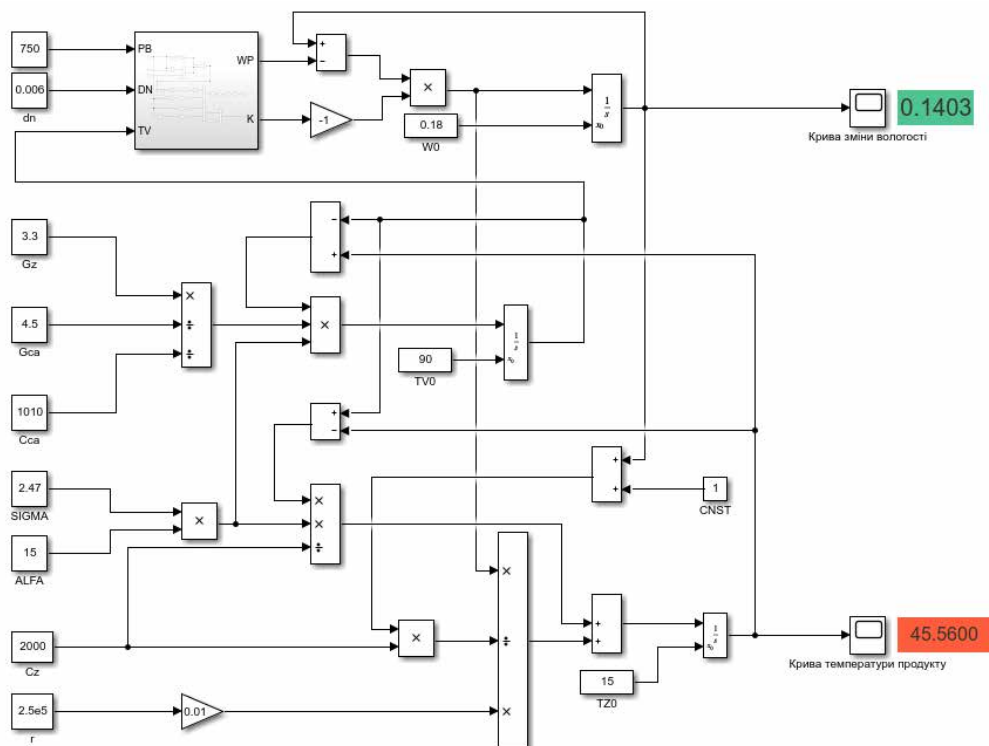


Рис. 2.2 Імітаційна модель для визначення температури та вологості зернової маси

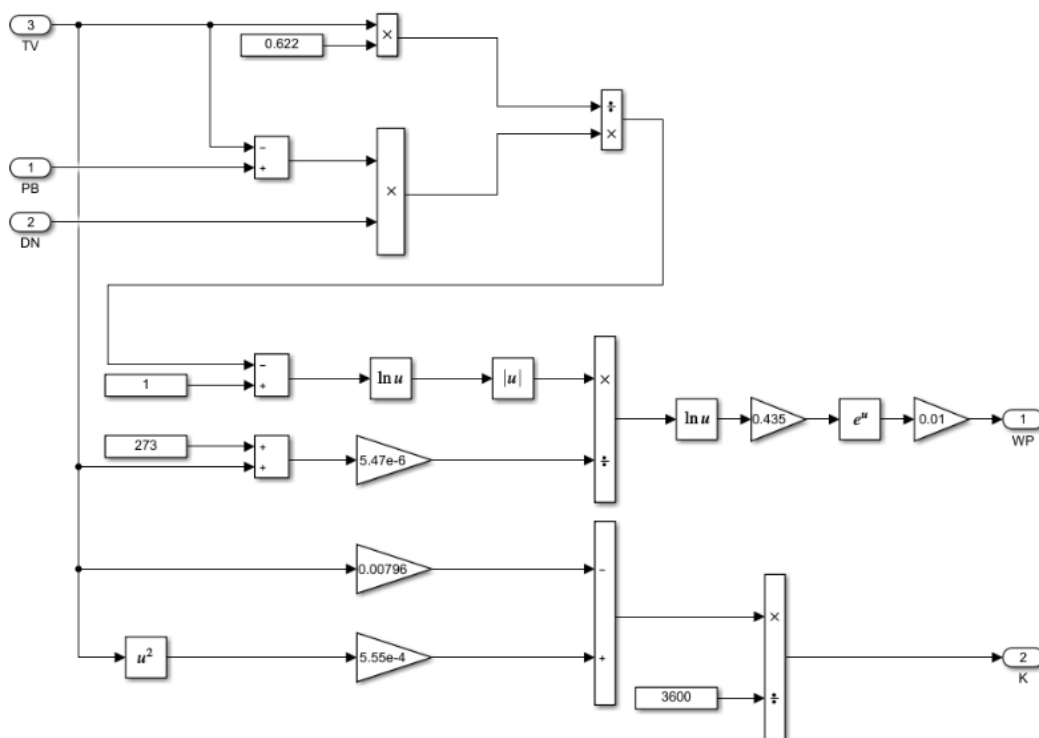


Рис. 2.3 Підсистема імітаційної моделі для розрахунку тиску насиченої водяної пари, відносної вологості повітря, рівноважної вологості зерна та коефіцієнта сушіння

У результаті виконання імітаційного моделювання були отримані графічні

залежності зміни температури зернової маси (рис. 2.4) та зміни вологості продукту в процесі сушіння (рис. 2.5).

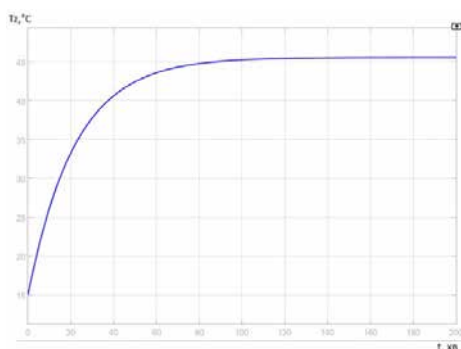


Рис. 2.4 Зміна температури продукта

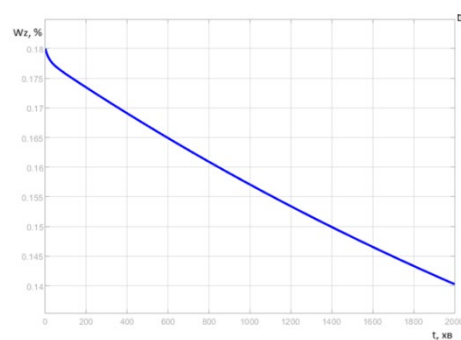


Рис. 2.5 Зміна вологості продукта

Дослідимо вплив витрати сушильного агента на температуру зернової маси та її кінцевий вологовміст на виході із сушарки. При цьому початковий вологовміст зерна приймаємо сталим: $W_0 = 0,18$, а температуру сушильного агента підтримуємо на рівні $\theta_0 = 90^\circ\text{C}$.

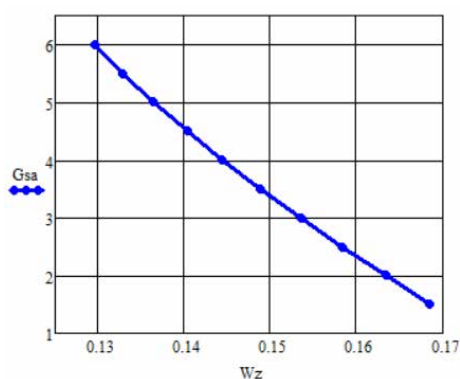


Рис. 2.6 Вплив витрати сушильного агента на вологовміст

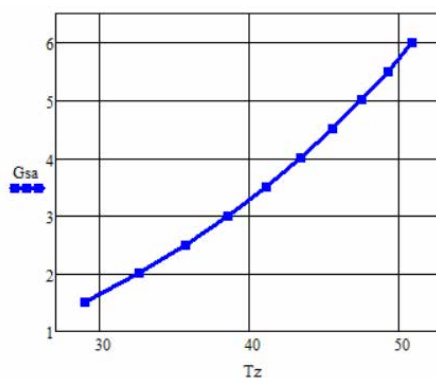


Рис. 2.7 Вплив витрати сушильного агента на температуру продукту

При підвищенні температури зернової маси від початкового значення 15 °С до гранично допустимої температури 57 °С (за умови допустимої температури нагрівання $W_{гр} = 60$ °С) характер зміни температури зерна матиме вигляд, наведений на рис. 2.8.

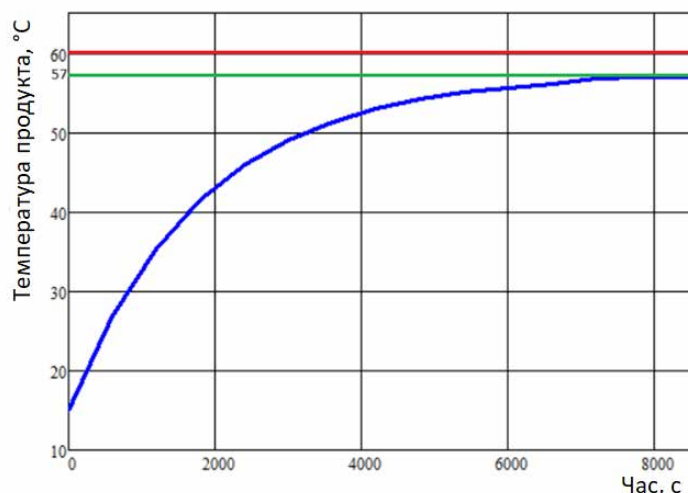


Рис. 2.8 Розгінна крива нагрівання продукту від 15°С до 57°С

2.3 Отримання передатної функції за каналом регулювання температури продукту.

Для аналізу динамічних властивостей зерносушарки як об'єкта автоматичного керування було використано її характеристики прискорення, що відображають температурну залежність маси зерна від часу у відповідь на ступінчасту зміну керуючого впливу.

Для подальшого аналізу та визначення параметрів об'єкта виконаємо нормалізацію характеристик прискорення згідно з виразом:

$$y_n(t_i) = \frac{y(t_i) - y(t_0)}{y(t_{max}) - y(t_0)} = \frac{y(t_i) - 15}{57 - 15}, \quad (2.15)$$

Нормована розгінна характеристика шахтної зерносушарки для каналу регулювання зображена на рис. 2.9.

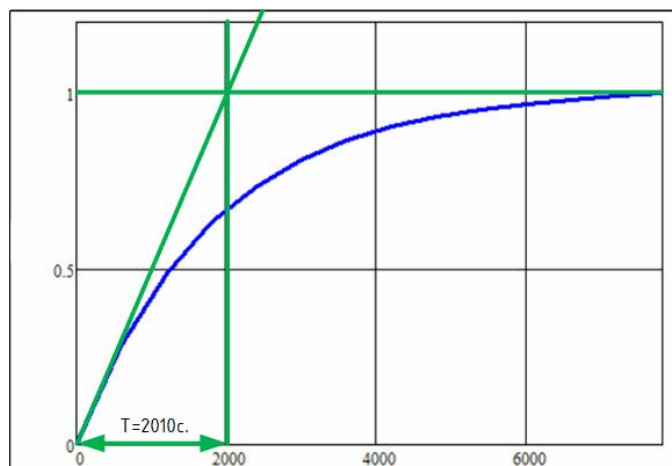


Рис. 2.9 Нормована розгінна характеристика шахтної зерносушарки для каналу регулювання температури сушіння продукта

Визначимо запізнення для каналу регулювання за виразом:

$$\tau = \frac{V_{\text{п.п.}}}{V_{\text{с.а.}}}, \quad (2.16)$$

де: $V_{\text{п.п.}}$ – об'єм повітропроводу, м^3 ; $V_{\text{с.а.}}$ – об'єм сушильного агента.

$$V_{\text{п.п.}} = \pi * R^2 * L = S * L \quad (2.17)$$

$$V_{\text{с.а.}} = \frac{G_{\text{са}}}{\rho}, \quad (2.18)$$

де: R – радіус повітропроводу, L – довжина повітропроводу, ρ – густина сушильного агента.

$$V_{\text{п.п.}} = 1 * 10 = 10 \text{ м}^3 \quad (2.19)$$

$$V_{\text{с.а.}} = \frac{4,5}{1,293} = 3,48 \text{ м}^3/\text{с} \quad (2.20)$$

$$\tau = \frac{10}{3.48} = 2.87 \text{ с}. \quad (2.21)$$

Коефіцієнт передачі об'єкта керування визначаємо за формулою:

$$k = \frac{T_{\text{к}} - T_{\text{п}}}{L_{\text{к}} - L_{\text{п}}}, \quad (2.22)$$

де: $T_{\text{к}}$ та $T_{\text{п}}$ – кінцева та початкова температура, $^{\circ}\text{C}$; $L_{\text{к}}$ та $L_{\text{п}}$ – відповідно кінцеве та початкове значення продуктивності системи подачі сушильного агента, %. $T_{\text{к}} = 57^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{п}} = 15^{\circ}\text{C}$, $L_{\text{к}} = 100\%$, $L_{\text{п}} = 0\%$.

$$k = \frac{57 - 15}{100 - 0} = \frac{42}{100} = 0,42 \text{ }^{\circ}\text{C}/\% \quad (2.23)$$

Отримаємо передатну функцію шахтної зерносушильної установки для каналу керування температурою сушіння.

$$W(s) = \frac{0.42}{2010 * s + 1} * e^{-2.87*s} \quad (2.24)$$

РОЗДІЛ 3. ВИБІР ПРИНЦИПУ ТА ЗАКОНУ КЕРУВАННЯ.

3.1 Обґрунтування прийнятого алгоритму керування.

Вивчення динамічних характеристик об'єкта керування дозволяє вибрати найбільш доцільний алгоритм автоматичного керування на етапі проектування. Для цього необхідно проаналізувати зв'язок між постійною часу об'єкта та значенням його затримки.

У випадку виконання умови $0,2 \leq \tau/T \leq 1$ доцільно використовувати лінійний алгоритм керування. Якщо співвідношення $\tau/T > 1$, рекомендується використовувати імпульсний принцип керування. При значенні $\tau/T < 0,2$ найефективнішим є позиційний алгоритм керування [12].

$$\frac{\tau}{T} = \frac{2.87}{2010} = 0.0014 \quad (3.1)$$

Згідно з отриманими динамічними характеристиками об'єкта, можливо використовувати позиційний алгоритм керування. Однак використання цього методу регулювання є недоцільним через великі коливання температури, які можуть призвести до перегріву зернової маси. Крім того, процес сушіння передбачає безперервну подачу сушильного агента, тому система повинна забезпечувати плавне регулювання параметрів процесу.

Для системи автоматичного керування приймаємо такі перехідні показники якості процесу:

- тип процесу – аперіодичний;
- перерегулювання: $\sigma < 5 \%$;
- час регулювання: $T_r < 5000 \text{ с}$;
- статична похибка: $\Delta < 0,5 \%$;
- кількість коливань: $N = 1$.

Далі визначимо динамічний коефіцієнт регулювання за формулою (3.2) та виконаємо вибір типу регулятора графічним методом.

$$R_d = \frac{y_1}{K * y_{зб}} \quad (3.2)$$

де: $y_{зб}$ – де $f_{\max}$ — максимально можливе значення збурення за

навантаженням, яке для даного об'єкта керування становить 40 %;

$$R_d = \frac{3}{0,42 * 40} = 0,178 \quad (3.3)$$

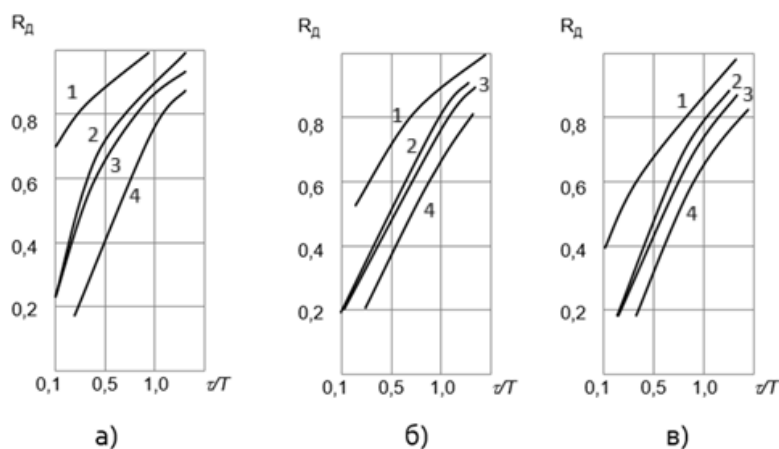


Рис. 3.1 – Залежність коефіцієнта динамічного керування від характеристик об'єкта керування: а – для аперіодичного процесу; б – для процесу з перевищенням 20%; с – для процесу з мінімальним загальним критерієм якості; 1 – Р-регулятор; 2 – І-регулятор; 3 – PI-регулятор; 4 – PID-регулятор.

З аналізу графічних залежностей (рис. 3.1) було визначено, що для забезпечення певних показників якості аперіодичного перехідного процесу найбільш доцільним є використання PID-регулятора [12].

РОЗДІЛ 4. ПІДБІР АПАРАТНИХ ЗАСОБІВ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ.

4.1 Вибір контролера, модулів розширення, панелі оператора та мережевого обладнання.

Для реалізації системи автоматичного керування було обрано програмований логічний контролер Schneider Electric Modicon M241CE40T (рис. 4.1) та модуль аналогових входів TM3AI8 (рис. 4.2).



Рис. 4.1 Schneider Electric Modicon
M241CE40T



Рис. 4.2 Модуль розширення
аналогових входів TM3AI8

Контролер Schneider Electric Modicon M241CE40T належить до серії Modicon M241 та призначений для систем автоматизації будівель низької та середньої складності. Пристрій підтримує дискретну та аналогову обробку сигналів і оснащений передовими інтерфейсами зв'язку Ethernet, USB та послідовний. Контролер характеризується високою швидкістю, компактними розмірами та надійністю, що робить його ефективним рішенням для автоматизації технологічних процесів.

Модуль розширення Schneider Electric TM3AI8 використовується разом з контролерами серії Modicon та забезпечує підключення аналогових датчиків до системи керування. Модуль має 8 аналогових входів для роботи з сигналами струму та напруги. Живлення здійснюється від джерела 24 В постійного струму.

Для забезпечення взаємодії оператора з автоматизованою системою керування було обрано операторську панель Schneider Electric Harmony STO7 марки Schneider Electric (рис. 4.3).



Рис. 4.3 Harmony STO7 марки Schneider Electric

Панель оператора Harmony STO7 призначена для візуалізації технологічного процесу, відображення поточних робочих параметрів системи та введення команд керування. Пристрій оснащений сенсорним дисплеєм, підтримує обмін даними з програмованими логічними контролерами через промислові комунікаційні інтерфейси та забезпечує зручне керування технологічним обладнанням у режимі реального часу.

Автоматизована система керування забезпечує можливість дистанційного моніторингу технологічного процесу через веб-інтерфейс у локальній мережі. Таке рішення дозволяє контролювати роботу обладнання під час експлуатації та пусконаладжувальних робіт, а також забезпечує резервний канал для моніторингу основних параметрів системи у разі виникнення аварійних або нестандартних ситуацій.

Для реалізації мережевої взаємодії використовувалися промисловий маршрутизатор RUT956 (рис. 4.4) та комутатор Ethernet, керований комутатором Ethernet Schneider Electric ConneXium TCSESM083F2CU0 (рис. 4.5).



Рис. 4.4 Промисловий маршрутизатор
Teltonika Networks RUT956



Рис. 4.5 Ethernet-комутатор Schneider
Electric ConneXium
TCSESM083F2CU0

4.2 Підбір виконавчих пристроїв системи керування.

У попередніх розділах було встановлено, що процес сушіння зерна буде регулюватися безперервною зміною подачі сушильного агента на вал зерносушарки. Реалізація цього методу керування передбачає використання вентилятора з можливістю плавного регулювання швидкості обертання електроприводу.

Під час вибору виконавчого механізму враховувалися вимоги щодо забезпечення необхідної продуктивності та статичного тиску для ефективного потоку повітря через шар зернової маси. Для цього засобу керування необхідний статичний тиск повинен бути в діапазоні 2000–2600 Па, а коефіцієнт корисної дії вентилятора – не менше 20 тис. м³/год.

Відповідно до заданих технічних вимог було обрано радіальний вентилятор ВР 280-46 (рис. 4.6). Цей вентилятор характеризується стабільною роботою, високим коефіцієнтом корисної дії та можливістю регулювання подачі повітря в широких межах.



Рис. 4.6 Вентилятор ВР 280-46

Таблиця 4.3

Вентилятор	Потужність електродвигуна, кВт	Частота обертання робочого колеса, об/хв	Продуктивність, тис. м³/год	Тиск, Па
ВР 280-46	18,5	1500	20	2450

Привід вентилятора здійснюється від асинхронного трифазного електродвигуна Siemens 1LE1503-2AB23-4AA4 (рис. 4.7). Цей двигун характеризується високою надійністю, стабільною роботою при тривалих навантаженнях та можливістю використання в системах з частотним регулюванням швидкості обертання.



Рис. 4.7 Електродвигун Siemens Siemens 1LE1503-2AB23-4AA4

Для інших частин автоматизованої системи ми обираємо виконавчі механізми. До них належать приводи заряджання та розвантаження конвеєрів НС(1-в), НС(2-ж), електромагнітні клапани подачі повітря та палива НС(3-г), НС(3-д) та трансформатор запалювання пальника НС(3-г).



Рис. 4.7

Двигун Siemens
1LE1002-1AA42-
2AA4-Z D22



Рис. 4. Двигун

Siemens 1LE1002-
1AA42-2AA4-Z
D22



Рис. 4.9

Клапан
соленоїдний
NS(3-г); (3-д)



Рис.4.10

Трансформатор
розпалу NS(3-г)

Згідно з технічними характеристиками зерносушарки, загальний об'єм шахти сушарки та силосного відсіку становить 18 тонн зерна. Тому основним критерієм вибору завантажувально-розвантажувальних конвеєрів є їхня продуктивність.

Для цієї системи були обрані шнекові конвеєри AgroheliX, які разом з асинхронними електродвигунами потужністю 3 кВт забезпечують продуктивність до 50 т/год . Ці характеристики повністю відповідають вимогам технологічного процесу сушіння зерна.

4.3 Обґрунтування вибору частотного перетворювача.

Для реалізації системи керування подачею осушувача (рис. 4.11) було обрано частотний перетворювач Schneider Electric Altivar ATV630U22M3. Ця машина призначена для м'якого керування швидкістю обертання асинхронного електродвигуна та відповідає вимогам процесу сушіння зерна.

Перетворювач має номінальну потужність 22 кВт, чого достатньо для роботи вентиляторного двигуна. Завдяки частотному регулюванню можна змінювати продуктивність вентилятора залежно від режиму сушіння, що допомагає підтримувати стабільні температурні параметри та економити електроенергію.



Рис. 4.11 Частотний перетворювач Schneider Electric Altivar ATV630U22M3

4.4 Вибір датчиків і вимірювальних перетворювачів.

Під час вибору вимірювальних перетворювачів важливо враховувати вимоги, що залежать від функцій автоматизованої системи керування. По-перше, перетворювачі повинні мати лінійні та однозначні статичні характеристики з допустимою нелінійністю в межах 0,1-3,0%. Вони повинні забезпечувати високу чутливість до змін контрольованих параметрів та зберігати стабільність своїх характеристик протягом тривалого періоду використання.

Достатня швидкість роботи, стійкість до впливу навколишнього середовища та мінімальний вплив на вимірювані фізичні розміри також є важливими вимогами. Крім того, вимірювальні прилади повинні бути зручними для встановлення, обслуговування та заміни.

Для зменшення динамічної похибки постійна часу вимірювального перетворювача повинна бути значно меншою за постійну часу об'єкта керування.

Постійна часу вимірювального перетворювача T_{vm} повинна бути значно меншою за постійну часу об'єкта керування струмом. Для цього технологічного процесу постійна часу об'єкта становить 2010 секунд.

З урахуванням цих вимог для системи автоматичного керування були обрані електронні термоперетворювачі ifm IFM TA2405 (див. рис. 4.9) [26].



Рис. 4.9 Термоперетворювачі Ifm Electronic IFM TA2405

Технічні характеристики вимірювального перетворювача подані в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3.

Характеристика	Значення
Діапазон вимірювання температури	–50...150 °C
Тип чутливого елемента	Pt1000, клас А
Абсолютна похибка вимірювання	±0,3 °C
Напруга живлення	18...32 В DC
Вихідний сигнал	4–20 мА
Час теплової реакції	3 с
Тип приєднання	G 1/4
Інтерфейс налаштування	IO-Link

Для цього процесу корисно встановити робочий діапазон вимірювання від 0 °C до 100 °C, оскільки він найкраще підходить для сушіння зерна та дозволяє підвищити точність вимірювання температури в цьому діапазоні.

З точки зору динамічних характеристик, термоперетворювач можна розглядати як інерційну комірку першого порядку. Його передавальна функція виглядає так:

$$W_{\text{вп}}(s) = \frac{k_{\text{вп}}}{T_{\text{вп}} * s + 1} \quad (4.15)$$

де: $k_{\text{вп}}$ – коефіцієнт передачі вимірювального перетворювача; $T_{\text{вп}}$ – постійна часу

вимірювального перетворювача.

$$k_{\text{вп}} = \frac{\Delta I}{\Delta T} = \frac{20 - 4}{100 - 0} = 0.16, \quad (4.16)$$

де: ΔI - різниця струмів, що відповідає значенням температур в робочому діапазоні, мА; ΔT - різниця значень вимірюваних датчиком температур, °С.

Враховуючи, що показник теплової інерції сприймаючого елемента складає $T_{\text{вп}} = 3$ с. відповідно технічних характеристик, передатна функція вимірювального перетворювача:

$$W_{\text{вп}}(s) = \frac{0,16}{3 * s + 1} \quad (4.17)$$

Коли я вибирав вимірювальні прилади для решти автоматизованої системи, то спирався на функціональну схему. Щоб стежити за всіма показниками технологічного процесу, я вибрав датчик вологості зерна Wile 65, датчик рівня Pepperl+Fuchs UB800-18GM40, датчик, який контролює полум'я, Honeywell C7027A, а також реле для контролю тиску газу Kromschröder DG50U.



Рисунок 4.2.2. –
Датчик вологості
зерна Wile 65



Рисунок 4.2.3. –
Давач рівня
Pepperl+Fuchs
UB800-18GM40



Рисунок 4.2.4. –
Давач наявності
полум'я
Honeywell
C7027A



Рисунок 4.2.5. –
Давач тиску
Kromschröder
DG50U

Вологомір A315 – це такий прилад, що використовує мікрохвилі і може працювати з різними видами зерна. Він визначає, скільки в ньому води, дивлячись на те, як зерно та вода реагують на електрику на дуже високих частотах. Тому для цієї системи спостереження він підходить просто ідеально.

РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА ЦИФРОВОГО КОНТУРУ КЕРУВАННЯ.

5.1 Проєктування цифрової системи автоматичного регулювання.

Зараз системи автоматизації, як правило, працюють на цифрових контролерах. Це дає їм можливість точно, стабільно і гнучко організовувати різні процеси. Оскільки сигнали обробляються програмами, такі системи легко підлаштовуються під зміни в роботі, виконують складні команди і можуть передавати дані між різними пристроями в промислових мережах.

Коли ми починаємо розробляти будь-яку цифрову систему, спочатку потрібно зрозуміти, який час дискретизації буде прийнятним. Для цього ми скористаємося програмою Mathcad.

Потрібно буде побудувати графік, який покаже амплітудні та частотні характеристики лінійної розімкнутої системи. Далі визначаємо, де знаходиться рівень 5% від найвищої амплітуди $A(0)$, і знаходимо частоту, що відповідає цьому значенню (рис. 5.1).

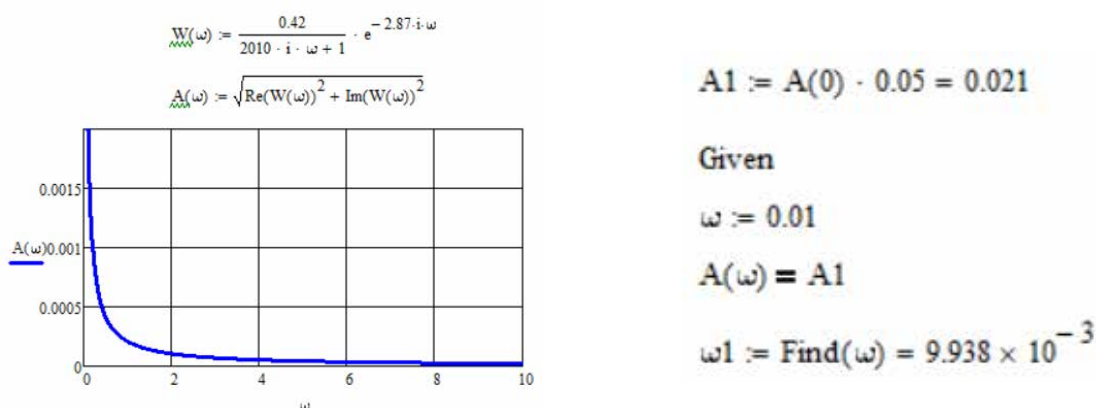


Рис. 5.1 Побудова АЧХ лінійної розімкнутої системи та визначення частоти

Визначимо гранично допустиме значення часу дискретизації цифрової системи керування за таким співвідношенням:

$$\frac{\pi}{\omega_1} = 316.125$$

Рис. 5.2 Розрахунок граничного часу дискретизації

Отже, для даної системи автоматичного керування граничне значення часу дискретизації становить $t_g = 316$ с.

Визначимо коефіцієнти пропорційної, інтегральної та диференціальної складових для цифрової системи керування на основі параметрів регулятора, отриманих у п. 3.2. Розрахунок виконаємо за такими формулами:

$$K_p = K_p = 75 \quad (4.18)$$

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} = \frac{75}{500} = 0,15 \quad (4.19)$$

$$K_d = K_p * T_n = 75 * 250 = 18750 \quad (4.20)$$

Сформуємо цифрову схему керування з урахуванням умови $t_d < t_r$. Оскільки граничний час дискретизації становить приймаємо робочий час дискретизації $t_d < t_r$, $t_d = 0,316$ с.

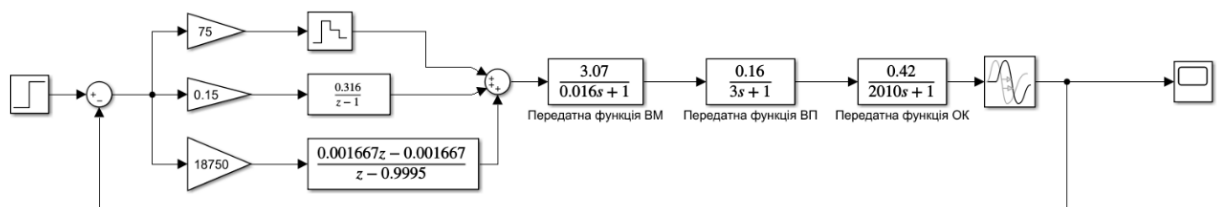


Рис. 5.3 Схема цифрової системи керування

Ми розглянемо Z , яка складається з інтегральної та диференціальної складових ПД-регулятора. Для диференціальної складової ми виставимо постійну часу T , що дорівнює 600 секундам. Таке значення краще впливає на те, як проходять перехідні процеси в реальному контролері, і допомагає зменшити дію раптових змін сигналу.

<code>>> w1 = tf(1,[1,0])</code>	<code>>> c2d(w1,0.316)</code>	<code>>> w2 = tf([1,0],[600,1])</code>	<code>>> c2d(w2,0.316)</code>
w1 =	ans =	w2 =	ans =
1	0.316	s	0.001667 z - 0.001667
-	----	-----	-----
s	z - 1	600 s + 1	z - 0.9995
Continuous-time transfer function.	Sample time: 0.316 seconds Discrete-time transfer function.	Continuous-time transfer function.	Sample time: 0.316 seconds Discrete-time transfer function.

Рис. 5.4 Z – перетворення
інтегральної складової

Рис. 5.5 Z – перетворення
диференційної складової

Отримано графік перехідного процесу системи керування із цифровим ПД-регулятором, який наведено на рис. 5.6.

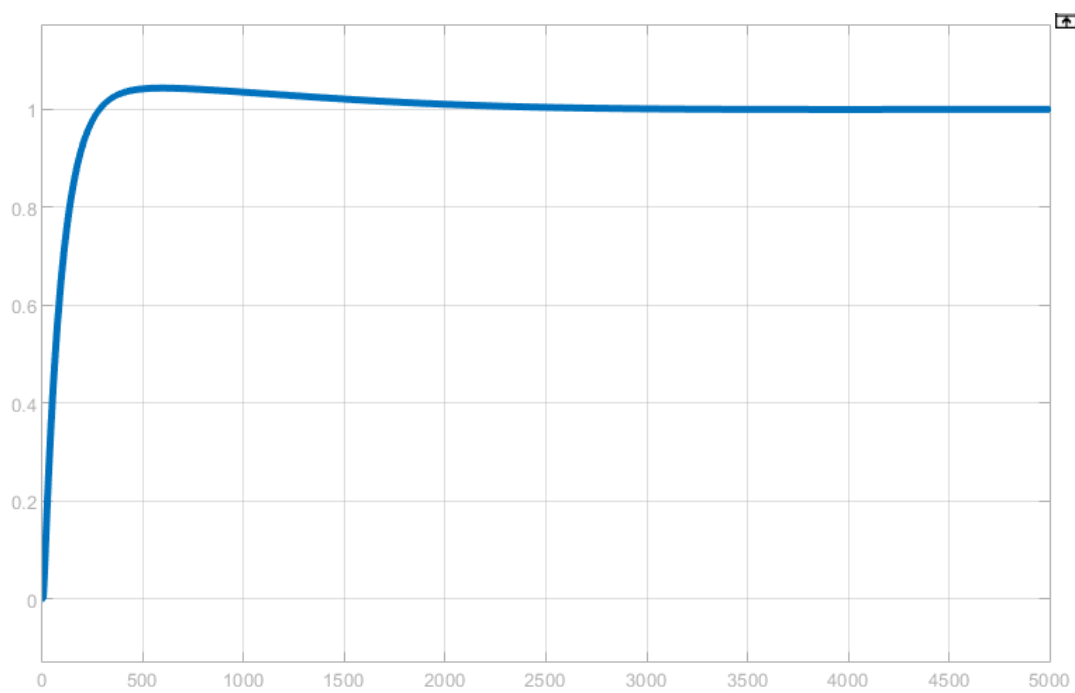


Рис. 5.6 Перехідний процес системи керування з цифровим ПІД-регулятором

5.2 Оцінка роботи цифрової системи керування.

Порівняємо задані показники якості, визначені у п. 3.1, з параметрами перехідного процесу, отриманими після синтезу цифрової системи керування.

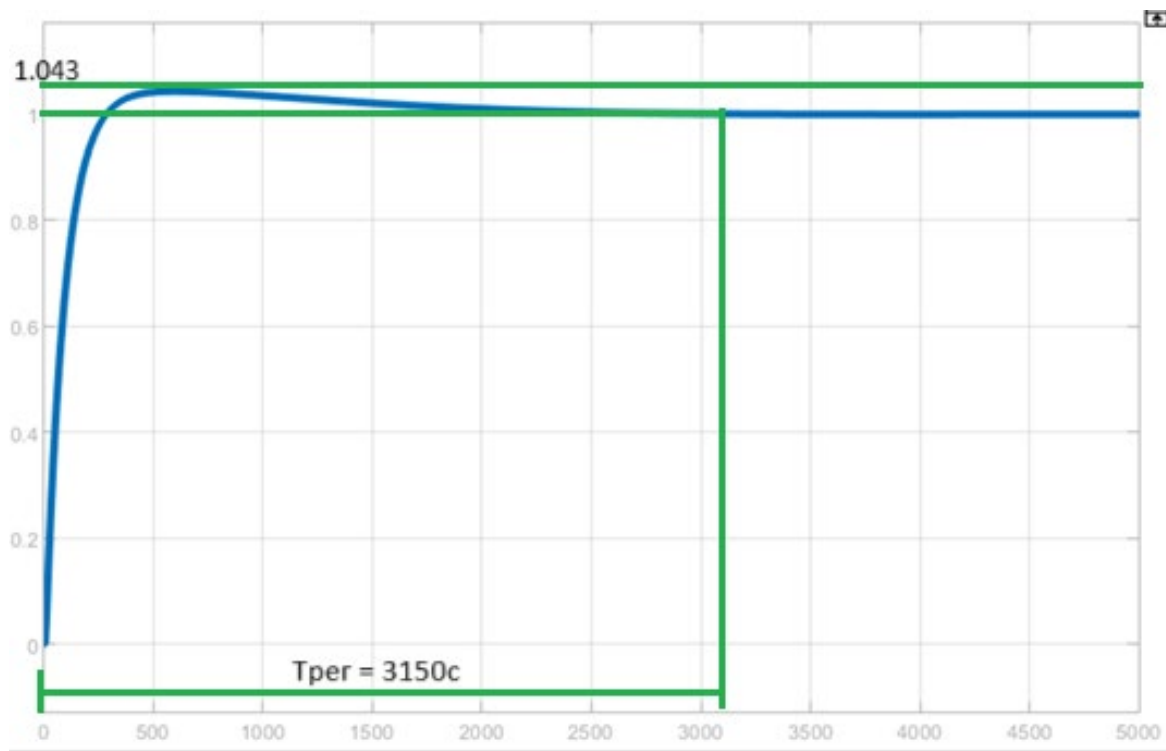


Рис. 5.7 Аналіз перехідного процесу з цифровим ПІД-регулятором

На основі аналізу перехідного процесу системи з цифровим ПІД-регулятором

(рис. 5.7) можна зробити такі висновки:

1. характер перехідного процесу – аперіодичний;
2. перерегулювання системи становить: $\sigma = \frac{y_{max} - y_{уст}}{y_{уст}} * 100\% = \frac{1,043 - 1}{1} * 100\% = 4.3\%$
3. Час регулювання: $T_p < 3150c$;
4. Статична похибка: $\Delta = 0\%$;
5. Кількість коливань: $N=1$.

За результатами ми бачимо, що наша цифрова система керування відповідає всім тим вимогам до якості перехідних процесів, про які ми вже згадували у розділі 3.1. Вона працює дуже стабільно, має невелике перерегулювання і зовсім не дає постійної похибки. А це, своєю чергою, підтверджує, наскільки ефективним виявився наш комбінований ПД-регулятор.

РОЗДІЛ 6. ПРОЄКТУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМ ТА ШАФИ КЕРУВАННЯ.

6.1 Побудова принципової електричної схеми.

Система, яка автоматично керує сушінням зерна у вертикальній сушарці, працює на базі технології Schneider Electric. Вона має кілька рівнів електричних та логічних схем, які відповідають за різні функції. Щоб було простіше, її структуру розбили на окремі сторінки, де кожна відповідає за щось своє. Всю схему повністю можна побачити в Додатку А до дипломної роботи.

На першій сторінці можна побачити, як система отримує та розподіляє електрику. Електрика надходить у систему через головний автоматичний вимикач QF1. Від вимикача QS1 струм йде на пристрій захисту FV1, який оберігає всю систему від раптових стрибків напруги. Далі електрика потрапляє на блок живлення G1. Він перетворює змінний струм на 24 В постійного, щоб могли працювати схеми керування та автоматики. Запобіжники FU1-FU5 стоять для захисту різних частин електрики. Ще є клеми для заземлення і для розподілу напруги.

Друга сторінка показує, як живляться та керуються електродвигуни. Електродвигуни M1 і M2, кожен по 3 кВт, крутять стрічки конвеєра, які завантажують і вивантажують зерно. Вентилятор, що подає повітря в сушарку, працює від двигуна M3 на 18,5 кВт. Цим двигуном керує спеціальний перетворювач частоти Altivar серії UZ1. Двигуни захищають автоматичні вимикачі QF2–QF4 та контактори KM1–KM3. А щоб керувати всіма механізмами, які щось роблять, є проміжні реле KV1–KV3.

У схемі також є електромагнітні клапани Y1 та Y2, перетворювач запалювання TV1 і лампочки HL2–HL4, які показують, як працює обладнання.

Ця система, яку я розробив, повністю автоматично керує всім процесом. Вона дбає про живлення і захист електрики, керує механізмами, показує всі потрібні дані і може працювати з іншими пристроями по мережі. Те, що ми використали модульну будову і сучасні промислові деталі, робить систему більш надійною.

6.2 Розробка схем з'єднань і підключення обладнання.

Схема підключення допомагає розібратися, як електрично з'єднані між собою різні частини в керуючій шафі, блоці чи на станції. На ній видно всі машини, пристрої, що виконують дії, та засоби для автоматизації процесів. Дуже важливо, щоб всі позначення – де що розташовано і як проходять електричні лінії – точно збігалися з тим, що є на самих схемах підключення.

Іноді на схемах підключення використовують так званий метод адресації, коли електричні з'єднання не малюють. Замість цього, біля місця з'єднання просто вказують, куди саме йде провід — пишуть адресу чи символ потрібної деталі. Завдяки цьому схема стає зрозумілішою, нічого не пропускається, а читати таку документацію набагато легше.

Сама схема підключення – це частина технічних паперів, і її головна мета – показати, як зовнішні пристрої фізично підключаються до шафи керування. На ній ви знайдете, як підключені пристрої-виконавці, різні датчики, кнопки керування, а також силові лінії – і як усе це приєднується до системних клем.

На цих схемах можна побачити, як прокладені кабелі, як позначені роз'єми, які кабелі за типом і перерізом потрібні, а також що за пристрої куди підключені. Усі дроти підключають згідно з тим, як система має працювати, і обов'язково дотримуючись правил електробезпеки. Це допомагає обладнанню працювати без збоїв, коли його вже змонтують і почнуть використовувати.

6.3 Компонування та зовнішній вигляд шафи керування.

Я вирішив встановити всі деталі автоматичної системи для сушіння зерна в електрошафу Schneider Electric Special S3DIP IP66, яку спеціально зробили для розміщення автоматики та елементів електроживлення. Завдяки своєму захисту IP66, ця шафа добре оберігає обладнання від пилу, вологи та будь-яких зовнішніх пошкоджень, а це дуже важливо для роботи в умовах великого сільськогосподарського виробництва.



Рис. 6.1 Шафа Schneider Electric Spacial S3D IP66

Коли розробляли зовнішній вигляд шафи керування (який можна побачити на рис. 6.2), одразу думали про те, куди поставити всі індикатори та органи управління. Їхнє розташування продумали до дрібниць, щоб було зручно користуватися, легко дістатися до обладнання всередині та безпечно його обслуговувати.

Спереду на шафі розмістили ось такі речі:

- HL1 - Лампочка, що показує живлення;
- QS1 - Основний вимикач;
- A3 - Сенсорний екран для керування;
- SB7 - Кнопка термінової зупинки;
- HL2–HL4, HL8 - Лампочки, що показують стан системи;
- SA1–SA3 - Перемикачі для зміни режимів;
- SB1–SB6, HL5–HL7 - Кнопки з підсвічуванням.

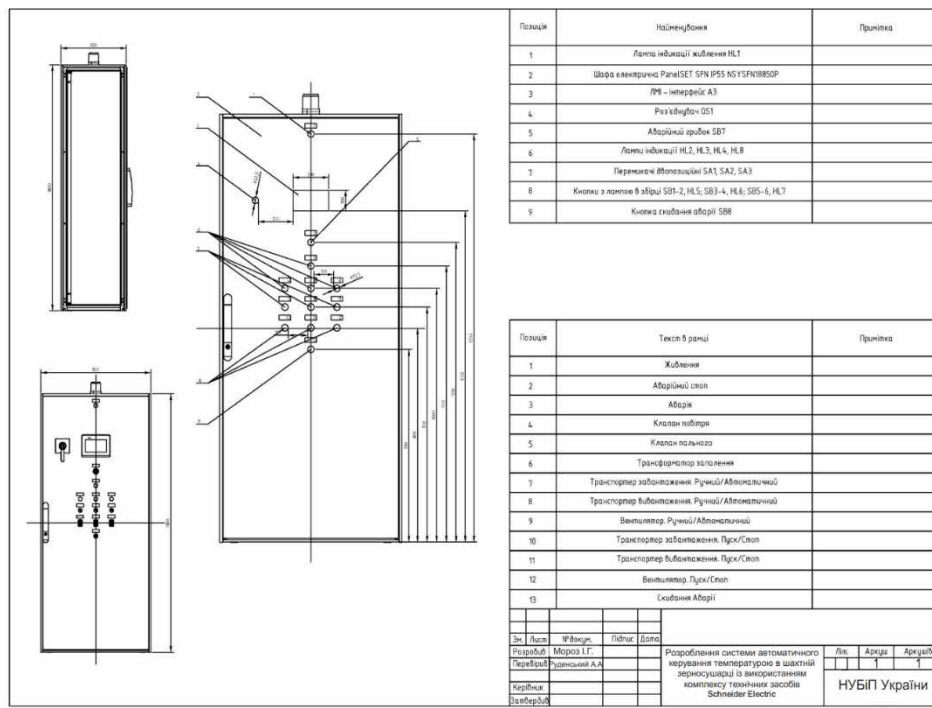


Рис.6.2 Фрагмент зовнішнього вигляду шафи керування

6.4 Підбір апаратури пуску та захисту.

У цій конструкції використовуємо три асинхронні електродвигуни: два двигуни ABB M2BAX100L, кожен потужністю 3 кВт, і один двигун ABB M2BAX160M на 18,5 кВт. Щоб ці двигуни працювали довго та без збоїв, дуже важливо правильно підібрати пристрій для їх захисту від пуску. Він має вберегти двигуни від перевантажень та коротких замикань.

У розрахунках ми візьмемо значення коефіцієнта потужності ($\cos\varphi$) та коефіцієнта корисної дії двигуна (η), які вказані в технічних характеристиках цих двигунів.

$$I_{\text{ном}} = \frac{P}{\sqrt{3} * U * \cos\varphi * \eta} = \frac{3000}{\sqrt{3} * 380 * 0,81 * 0,942} = 5.97(A) \quad (6.1)$$

$$I_{\text{ном}} = \frac{P}{\sqrt{3} * U * \cos\varphi * \eta} = \frac{18000}{\sqrt{3} * 380 * 0,81 * 0,942} = 35.85(A) \quad (6.2)$$

Для захисту двигунів конвеєрної стрічки обрали автоматичні вимикачі Schneider Electric TeSys GV2ME14 (рис. 6.1). Вони вміють відключати струм у діапазоні від 6 до 10 ампер і мають важливу характеристичну ємність. Таке рішення робить схему керування простішою і значно підвищує її надійність.



Рис. 6.1 Автоматичний вимикач Schneider Electric TeSys GV2ME14

Для захисту двигуна вентилятора взяли автоматичний вимикач Schneider Electric Acti9 iC60N A9F89432 (показано на рисунку 6.2). Він розрахований на 32 амperi і має функцію відключення типу С. Цей вимикач надійно захищає електричну мережу від перевантажень та коротких замикань, коли вентилятор працює.



Рис. 6.2 Автоматичний вимикач Schneider Electric Acti9 iC60N A9F89432

Під час вибору електромагнітних пускачів необхідно враховувати, що їх номінальна напруга повинна відповідати напрузі живлення електричної мережі або бути більшою за неї:

$$U_{\text{ном}} \geq U_{\text{мережі}} \quad (6.3)$$

$$380\text{V} \geq 380\text{V} \quad (6.4)$$

Допустиме значення струму силових контактів контактора повинно бути не меншим за номінальний струм навантаження, яке підключається до даного комутаційного апарата:

$$I_{\text{ном}} \geq I_{\text{двигунів}} \quad (6.5)$$

$$5,97 \geq 9A \quad (6.6)$$

$$35,85 \geq 40A \quad (6.7)$$

Робоча напруга котушки керування повинна відповідати значенню напруги кола керування системи:

$$U_{\text{ном.кот}} \geq U_{\text{мережі.кер}} \quad (6.8)$$

$$220V \geq 220V \quad (6.9)$$

З урахуванням розрахованих параметрів для приводів транспортерів було обрано контактори Schneider Electric TeSys D LC1D12M7 (рис. 6.3), а для електродвигуна вентилятора — контактор TeSys D LC1D50M7 (рис. 6.4).



Рис. 6.3 Контактор Schneider Electric
TeSys D LC1D12M7



Рис. 6.4 Контактор Schneider Electric
TeSys D LC1D50M7

6.5 Розрахунок і вибір кабельно-провідникової продукції.

Підбирали переріз кабелю так, щоб він міг витримувати робоче навантаження без перегріву і був достатньо надійним у використанні. Тут зважали на те, як кабель буде прокладатися, яке навантаження буде мати, і скільки потужності потрібно для лінії.

Для живлення обладнання використовуємо кабель VBbShvng. Всередині у нього мідні жили, ізоляція з ПВХ, а зверху — сталева стрічка, яка його захищає. Цей кабель підходить для електричних мереж до 1 кВ, і його особлива будова робить його стійким до механічних пошкоджень, що дуже важливо для

виробництва на агропромислових підприємствах.

Для схем керування беремо контрольний кабель KVBBShvng. Він потрібен, щоб передавати сигнали та команди між різними машинами, шафами керування та механізмами, які виконують ці команди. Те, що він має негорючу захисну оболонку, робить систему автоматизації безпечнішою та надійнішою.

А для підключення вимірювальних приладів вибрали кабель ÖLFLEX® CLASSIC 110 CY, у нього є захисний екран. Такий екран допомагає зменшити вплив сторонніх електромагнітних завад, тому цей кабель добре підходить для аналогових сигналів від датчиків, особливо таких, як 4-20 мА та 0-10 В.

Якщо дивитися на схему підключення, то для кабелю номер 1, який живить плату керування, постійний струм ми розраховуємо ось за такою формулою:

$$I_{\text{тр.до.в.к.}} = K * \sum I_{\text{спож}} + I_{\text{кер}}, \quad (6.10)$$

де: K – коефіцієнт одночасної роботи (прийmemo, що всі споживачі працюють одночасно, $K=1$); $I_{\text{кер}}$ – струм керування (прийmemo $I_{\text{кер}}=1\text{А}$).

$$I_{\text{тр.до.в.к.}} = 1 * 35,85 + 5,97 + 5,97 + 3,1 + 16 + 16 + 0,315 = 83,205 \quad (6.11)$$

РОЗДІЛ 7. РОЗРОБКА ПРОГРАМНОЇ ЧАСТИНИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.

7.1 Створення програми для ПЛК та операторської панелі.

Для автоматизації процесу сушіння використовуємо програмований логічний контролер (ПЛК) Schneider Electric M241CE40T разом з модулем TM3AI8. Саме цей модуль збирає дані з датчиків, обробляє їх і потім віддає команди різним механізмам, щоб вони працювали як слід.

Обрали саме таку конфігурацію, тому що вона дає нам достатньо цифрових і аналогових каналів для вводу та виводу даних. А вбудований інтерфейс Ethernet дозволяє підключатися через Modbus TCP/IP, що дуже зручно для того, щоб інтегрувати всю систему в нашу вже існуючу промислову мережу.

Контролер налаштований за спеціальною схемою автоматизації, яка показує, в якому порядку відбуваються всі операції та як підключені всі компоненти. Створений програмний код (рис. 7.1) повністю контролює всі етапи роботи — від початкового запуску до звичайної роботи або, у разі потреби, аварійного вимкнення.

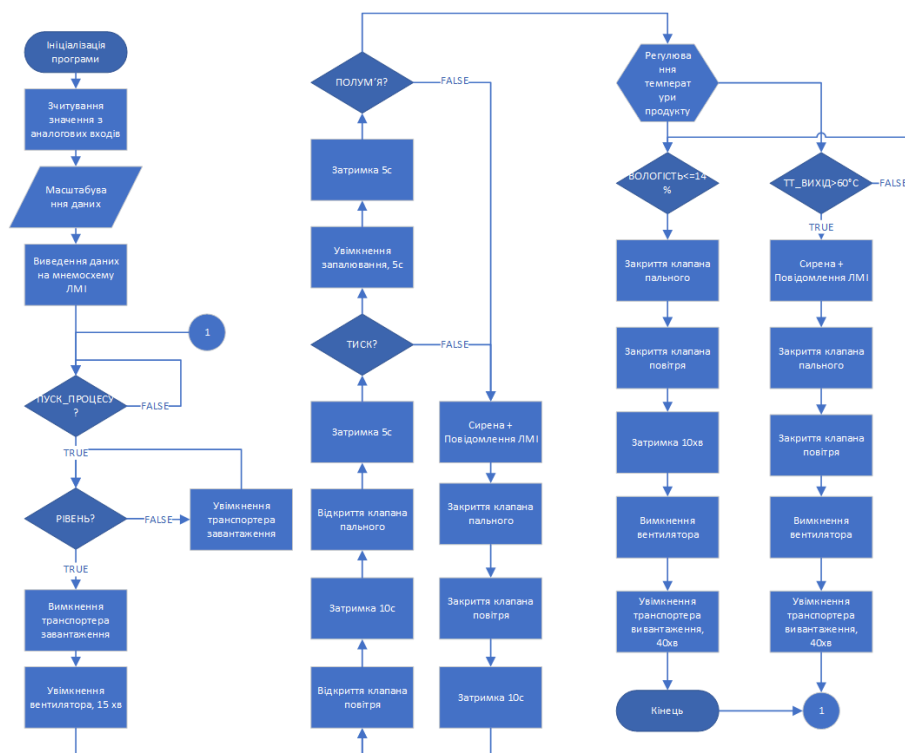


Рис. 7.1 Алгоритм роботи програмного забезпечення ПЛК

Коли система запускається, вона проходить етап налаштування: спочатку

зчитує аналогові сигнали, підлаштовує їх під задані параметри пристрою, а потім показує результати на екрані оператора.

Щоб почати роботу, треба дати команду «Почати роботу». Першим ділом система перевіряє рівень у зарядному баку: якщо заряду мало, вмикається живлення; а якщо бак повний, живлення вимикається, і на п'ятнадцять хвилин запускається вентиляція.

Запалювання відбувається поступово. Спершу по черзі відкриваються клапани для повітря та газу, при цьому контролюється тиск. Після цього вмикається пристрій для запалювання. Через п'ять секунд система дивиться, чи є полум'я.

Якщо полум'я немає або тиск знизився, система переходить в аварійний режим. Тоді спрацьовує звуковий сигнал, на екрані показується повідомлення, а подача газу й повітря зупиняється. За десять секунд цикл запалювання запускається знову.

Коли все успішно запустилося, температура автоматично тримається на заданому рівні, орієнтуючись на показники датчика. Водночас система стежить за вологістю матеріалу та температурою на виході з виробництва.

Щодо захисту від перегріву: якщо температура продукту піднімається вище 60°C, система сама вимикає подачу газу й повітря, зупиняє вентилятор та вмикає вакуумний механізм.

Система сама вимикається, як тільки вологість доходить до 14%. При цьому по черзі вимикаються всі робочі механізми, і вона повертається у вихідний стан.

Цю програму зробили за допомогою EcoStruxure Machine Expert – Basic, спеціально для контролерів M221. Основні процеси писали у вигляді сходиноквих діаграм (LD), а коли треба було відкалібрувати аналогові показники, брали списки інструкцій (IL).

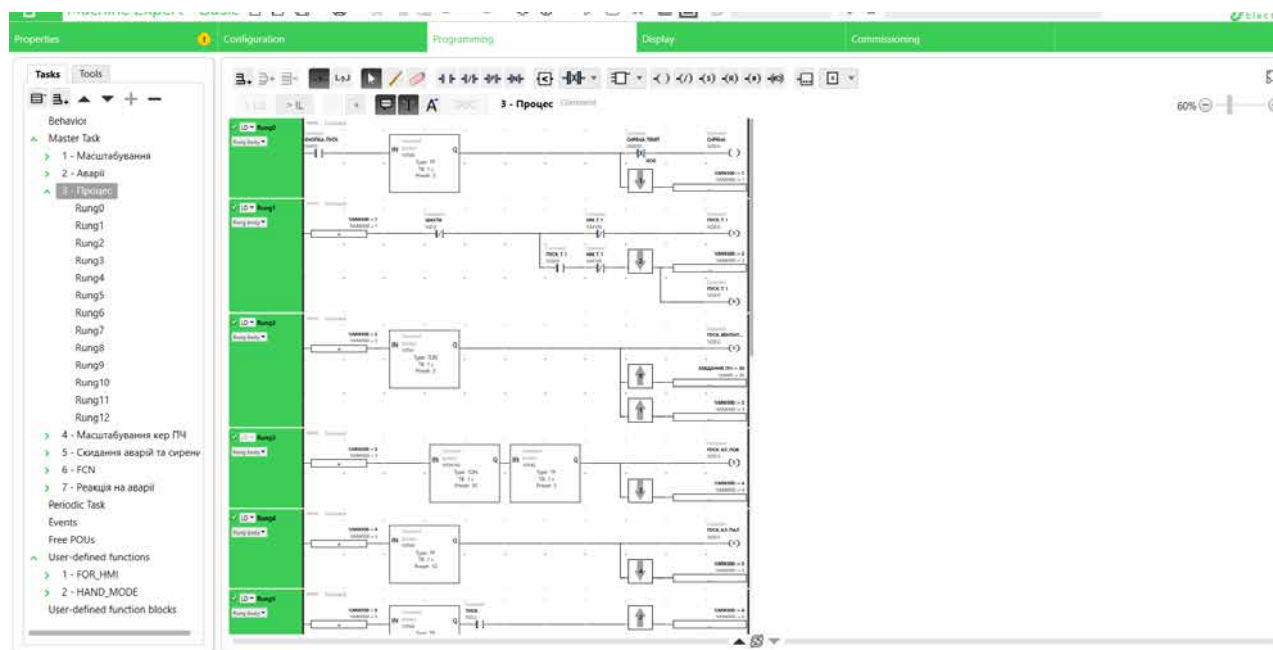


Рис. 7.2 Фрагмент програми системи автоматичного керування

Панель оператора Schneider Electric Harmony STO7 забезпечує зручний зв'язок між людиною та автоматизованими системами управління на промислових об'єктах. Вона виступає як візуальний центр, що дозволяє оператору контролювати технологічні процеси, отримувати інформацію з пристроїв, видавати команди та швидко реагувати на надзвичайні ситуації.

Програмне забезпечення EcoStruxure Operator Terminal Expert служить платформою для створення інтерфейсів між людиною та машиною на основі панелей HMIST. Головний екран (див. рис. 7.3) демонструє візуалізацію ключових параметрів процесу, таких як температура, вологість, частота та рівень, а також стан пальника, що допомагає оператору оцінювати роботу системи.

Справа розміщені кнопки для переходу на додаткові екрани — перегляд трендів, налаштувань, ручного режиму та журналу аварій. Це дозволяє оператору слідкувати за актуальними показниками, аналізувати історію, налаштовувати параметри та перемикатися між автоматичним і ручним управлінням. В окремих блоках відображається подача пального, повітря та стан роботи приводів.

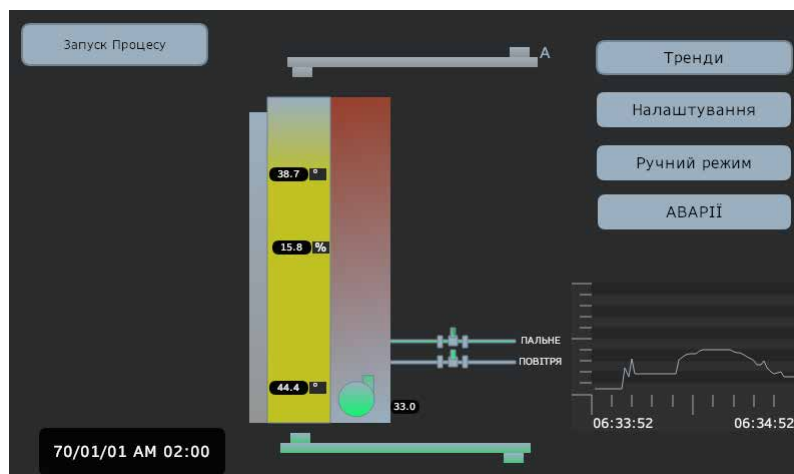


Рис. 7.3 Головний екран ЛМІ

Якщо з'єднаємо програмований контролер (ПЛК) Schneider Electric HMIST6400 і панель керування в одну спільну мережу (LAN), то можна зробити такий собі навчальний стенд, де буде добре видно, як ці два пристрої спілкуються між собою.

Тут ПЛК і та панель з екраном (графічний інтерфейс) 'спілкуються' через кабель Ethernet, використовуючи протокол Modbus TCP/IP. Щоб мережа працювала як слід, кожному пристрою треба дати постійну IP-адресу. Так уникнемо плутанини з адресами, матимемо надійне з'єднання і завжди зможемо точно зрозуміти, яке обладнання надсилає чи приймає дані.

Для цього досліді ПЛК отримав адресу 192.168.0.1, а панель керування – 192.168.0.2. Таке налаштування робить мережу простою і водночас надійною. З нею зручно перевіряти, наскільки добре ПЛК та панель з екраном 'порозуміються'.

7.2 Реалізація програмного забезпечення веб-інтерфейсу.

У сучасних системах автоматики веб-інтерфейс — це простий інструмент, який допомагає людям керувати обладнанням через звичайний інтернет-браузер. Завдяки йому можна дізнаватися, як працює система, не перебуваючи при цьому біля панелі керування чи місця оператора.

Оператор, використовуючи цей інтерфейс, може здалеку стежити за станом обладнання, бачити всі важливі показники роботи, відразу дізнаватися про будь-які неполадки і в цілому розуміти, як працює вся система — і все це у реальному

часі.

Дістатися до цього інтерфейсу можна з будь-якого пристрою, підключеного до мережі: чи то персональний комп'ютер, ноутбук, планшет або смартфон. Це робить роботу системи набагато зручнішою та спрощує керування, наприклад, сушінням зерна.

Спеціально для цієї автоматичної системи керування створюють мережу, де кожен головний пристрій, який обмінюється даними, отримує свою власну IP-адресу.

Відповідна схема мережі для процесу сушіння зерна наведена на рис. 7.8.

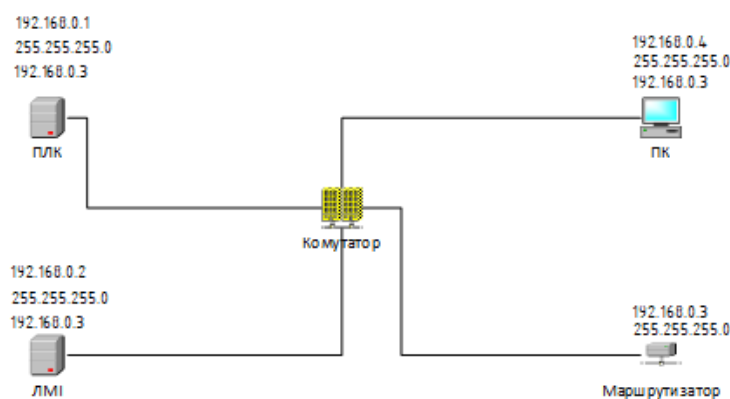


Рис. 7.8 - Схема побудови мережі системи автоматичного керування процесом сушіння зерна

Коли налаштовуємо мережу для автоматизованої системи керування, дуже важливо правильно задати адреси для кожного пристрою. Якщо використовувати постійні (статичні) IP-адреси, то всі частини мережі будуть мати надійний зв'язок, і це зробить обслуговування системи простішим.

Розроблена мережа (LAN) з адресою 192.168.0.0 і маскою підмережі 255.255.255.0. Завдяки такому налаштуванню, всі пристрої можна підключити до однієї частини мережі, і не потрібно буде робити додаткову маршрутизацію. Це допомагає даним передаватися швидше і робить обмін інформацією між різними частинами системи більш стабільним.

Отже, програмований логічний контролер (ПЛК) отримає адресу 192.168.0.1. Маршрутизатор, який має адресу 192.168.0.3, буде головним шлюзом – через нього можна буде віддалено підключитися до ПЛК, якщо це знадобиться. Панель

керування теж знаходиться в цій підмережі і має IP-адресу 192.168.0.2. Така система забезпечує стабільний обмін даними між екраном керування (НМІ) і ПЛК, використовуючи протокол Modbus TCP/IP. Комп'ютер, який ми використовуємо для налаштування системи, пошуку проблем і спостереження за нею, має мережеву адресу 192.168.0.4, маску підмережі 255.255.255.0 і шлюз 192.168.0.3. Це дає змогу використовувати його як інструмент для автоматичного програмування системи, керування її параметрами та обслуговування.

Маршрутизатор у цій мережі працює як шлюз і має постійну адресу 192.168.0.3. Крім того, що він з'єднує всі пристрої в мережі, він може також давати бездротовий доступ до системи в радіусі свого покриття. Це дуже зручно, адже так можна легко підключати мобільні пристрої, щоб стежити за технічним процесом.

Отже, таке налаштування IP-адрес створює зрозумілу і зручну мережеву інфраструктуру. Воно дає надійний зв'язок між блоком керування, панеллю, комп'ютером та маршрутизатором, а також залишає простір для того, щоб систему можна було розширити або підключити до інших інструментів моніторингу.

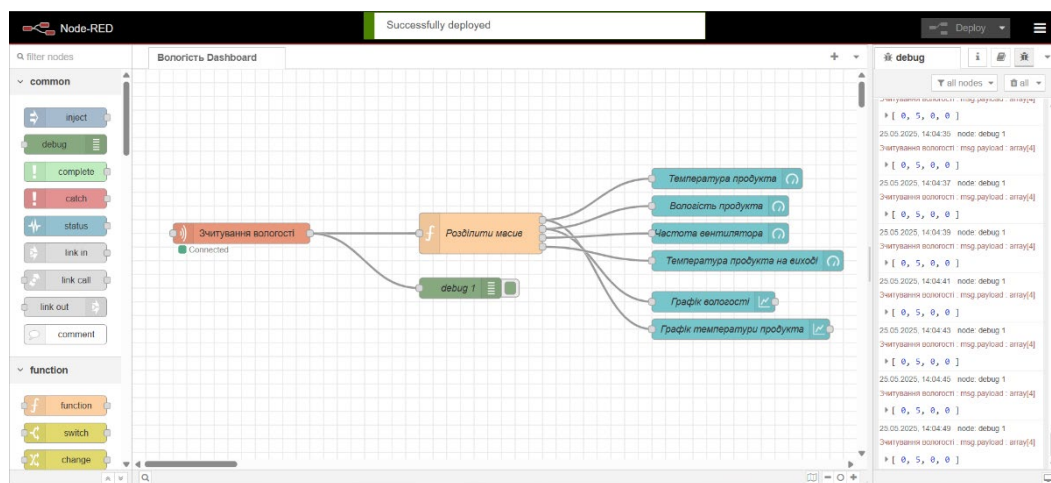


Рис. 7.9 - Налаштування програмного середовища для реалізації веб-інтерфейсу системи моніторингу

Веб-інтерфейс складається з кількох важливих частин, і кожна з них виконує свою роль, коли потрібно отримати, обробити або показати дані. На рис. 7.10 ми бачимо, як модулі працюють разом, передаючи інформацію від програмованого

логічного контролера (ПЛК) до панелі керування.

Ліворуч на схемі ми бачимо модуль, який приймає дані за допомогою протоколу Modbus TCP/IP. Його налаштування вказують, як працюватиме мережеве з'єднання, з яких регістрів потрібно брати інформацію та як часто перевіряти контролер. Основна робота цього модуля – регулярно зчитувати актуальні технічні дані з ПЛК.

Щойно дані отримані, сигнал йде до модуля функцій, а також до панелі керування. Модуль функцій обробляє весь масив отриманих значень і відбирає лише ті параметри, які знадобляться для показу. Панель керування потрібна під час першого запуску системи, щоб перевірити отримані дані та стежити за тим, як вони змінюються.

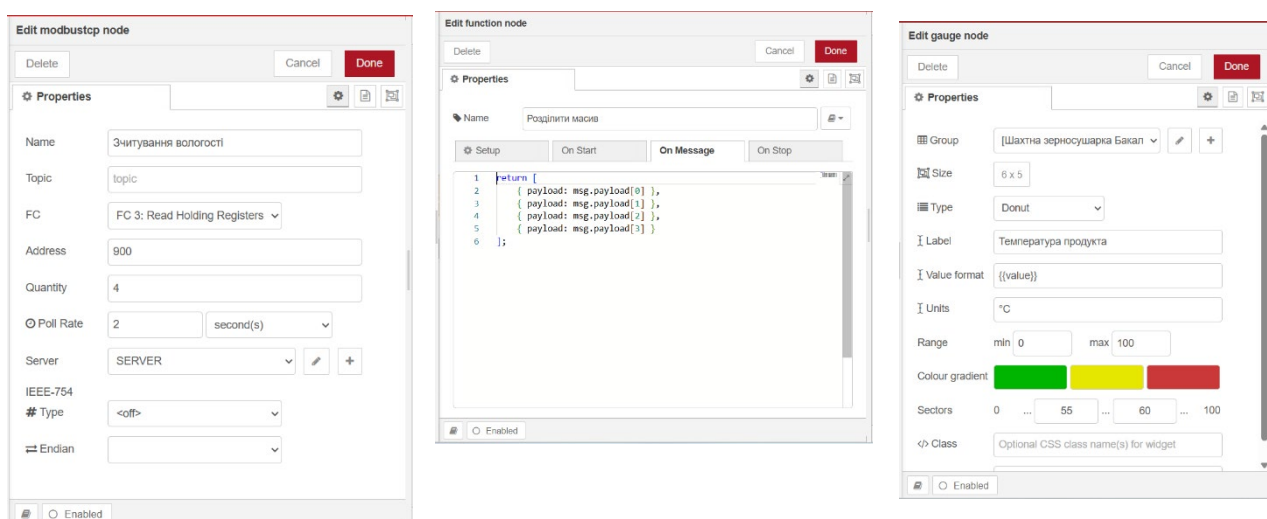


Рис. 7.10 - Налаштування функціональних блоків програмного середовища веб-інтерфейсу

На екрані з'являється спеціальна онлайн-панель. Вона одразу показує, які зараз значення мають найважливіші показники всього процесу.

Завдяки їй можна швидко стежити за тим, як працює вся система, дивитися, що змінилося в найважливіших показниках, і одразу ж реагувати, якщо щось раптом піде не за планом з обладнанням.

РОЗДІЛ 8. ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ЗАПРОПОНОВАНОГО ТЕХНІЧНОГО РІШЕННЯ.

Якщо встановити автоматичну систему для сушіння зерна, це допоможе сушити його ефективніше, зменшить потребу у втручанні людей і дозволить дотримуватися всіх технічних вимог. Крім того, автоматика дає змогу дуже точно контролювати температуру, вологість зерна, а також роботу вентиляторів, конвеєрів та обладнання для горіння. Це, своєю чергою, покращує якість кінцевого продукту і знижує ризик даремної витрати енергії.

Наскільки вигідно ставити таку систему, ми дивимося за кількома основними показниками: скільки потрібно вкласти грошей на початку, які будуть витрати на її використання, постійні витрати та скільки часу знадобиться, щоб вона себе окупила. Наприклад, початкові (капітальні) витрати — це ціна обладнання для автоматизації, його перевезення, монтаж, проведення електрики та інші подібні речі.

Постійні витрати ми рахуємо за такою формулою:

$$B_{зв.} = P + E_n * K, \quad (8.1)$$

де $B_{зв.}$ – зведені витрати, грн./рік; P – річні експлуатаційні витрати, грн./рік; K – капітальні витрати, грн.; E_n – нормальний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень, рік (прийmemo $E_n=0,15$).

Для розрахунку експлуатаційних витрат враховуються такі складові:

1. витрати на оплату праці обслуговуючого персоналу;
2. амортизаційні відрахування;
3. витрати на ремонт і технічне обслуговування;
4. витрати на електроенергію; інші експлуатаційні витрати.

Інші витрати візьmemo як 1% від всієї суми експлуатаційних витрат.

$$C_i = 0,01 * (C_{зп} + C_a + C_p + C_e), \quad (8.3)$$

До капітальних вкладень входять:

1. вартість придбання технічних засобів автоматизації;
2. торговельно-транспортні витрати;

3. витрати на монтаж обладнання;
4. витрати на прокладання кабельних ліній.

Торговельно-транспортні витрати приймаються у розмірі 11% від вартості технічних засобів:

$$K_{\text{тт}} = 0,11 * K_3, \quad (8.4)$$

Витрати на монтаж приймаються у розмірі 17% від вартості технічних засобів:

$$K_{\text{пр}} = 0,17 * K_3, \quad (8.5)$$

Витрати на проведення електричної проводки ($K_{\text{пр}}$)

Інші капітальні витрати приймаються у розмірі 2% від вартості технічних

$$K_i = 0,02 * K_3, \quad (8.7)$$

засобів:

Загальна вартість технічних засобів автоматизації системи керування процесом сушіння зерна наведена в таблиці 8.1.

Таблиця
8.1

№	Назва приладу	Тип	К-ть	Ціна за одиницю, грн	Загальна вартість, грн
1	Програмований логічний контролер	Schneider Electric Modicon M241CE40T	1	28 500,00	28 500,00
2	Модуль аналогових входів	Schneider Electric TM3AI8	1	12 800,00	12 800,00
3	Операторська панель	Schneider Electric Harmony STO7	1	24 600,00	24 600,00
4	Частотний перетворювач	Schneider Electric Altivar ATV630U22M3	1	89 000,00	89 000,00
5	Промисловий маршрутизатор	Teltonika Networks RUT956	1	15 200,00	15 200,00
6	Ethernet-комутатор	Schneider Electric ConneXium TCSESM083F2CU0	1	18 500,00	18 500,00
7	Електротехнічна шафа	Schneider Electric Spacial S3D IP66	1	14 700,00	14 700,00
8	Автоматичний вимикач ввідний	Schneider Electric Compact NSX100F	1	10 900,00	10 900,00
9	Головний роз'єднувач	Schneider Electric TeSys VCCF5	1	5 000,00	5 000,00
10	Пристрій захисту від імпульсних перенапруг	Schneider Electric EZ9L33720	1	3 100,00	3 100,00
11	Блок живлення 24 В DC	Schneider Electric ABLS1A24031	1	1 800,00	1 800,00
12	Автоматичний вимикач захисту двигуна	Schneider Electric TeSys GV2ME14	2	2 180,00	4 360,00
13	Автоматичний вимикач	Schneider Electric Acti9 iC60N A9F89432	1	2 200,00	2 200,00
14	Контактор для приводів транспортерів	Schneider Electric TeSys D LC1D12M7	2	1 500,00	3 000,00
15	Контактор для приводу вентилятора	Schneider Electric TeSys D LC1D50M7	1	5 800,00	5 800,00
16	Проміжне реле	Schneider Electric	5	525,00	2 625,00

		RXM4AB2BDPVS			
17	Реле безпеки	Schneider Electric XPSBAC14AC	1	6 100,00	6 100,00
18	Сигнальна лампа	Schneider Electric XB5AVB4	6	400,00	2 400,00
19	Кнопка керування	Schneider Electric XB5AA31	6	260,00	1 560,00
20	Кнопка аварійної зупинки	Schneider Electric XB4BS84441	1	1 070,00	1 070,00
21	Перемикач режимів роботи	Schneider Electric XB4BD33	3	540,00	1 620,00
22	Термоперетворювач	ifm electronic IFM TA2405	2	4 800,00	9 600,00
23	Датчик вологості зерна	Wile 65	1	14 500,00	14 500,00
24	Давач рівня	Pepperl+Fuchs UB800-18GM40	1	6 300,00	6 300,00
25	Давач контролю полум'я	Honeywell C7027A	1	7 900,00	7 900,00
26	Реле контролю тиску газу	Kromschroder DG50U	1	5 600,00	5 600,00
27	Соленоїдний клапан подачі газу	NS(3-д)	1	4 800,00	4 800,00
28	Соленоїдний клапан подачі повітря	NS(3-г)	1	4 800,00	4 800,00
29	Трансформатор розпалу	Danfoss EBI4 052F4030	1	3 200,00	3 200,00
30	Клеми монтажні	Schneider Electric NSYTRV	30	305,00	9 150,00
31	Кабель силовий	БББШВнг	20 м	150,00	3 000,00
32	Кабель керування	КБББШВнг	30 м	95,00	2 850,00
33	Кабель сигнальний екранований	OLFLEX CLASSIC 110 CY	20 м	120,00	2 400,00
34	Кабель мережевий	Corning U/UTP Cat 6 AWG 24 LSZH	20 м	45,00	900,00
	Разом				371 335,00

Отже, вартість технічних засобів автоматизації становить:

$$K_3 = 371335,00 \text{ грн}$$

Визначимо торгівельно-транспортні витрати:

$$K_{\text{ТТ}} = 0,11 * K_3 = 0,11 * 371335 = 40846,85 \text{ грн} \quad (8.9)$$

Визначимо витрати на монтаж обладнання:

$$K_{\text{М}} = 0,17 * K_3 = 0,17 * 371335 = 63126,95 \text{ грн} \quad (8.10)$$

Витрати на прокладання кабельних ліній приймаємо:

$$K_{\text{пр}} = 3000 \text{ грн} \quad (8.11)$$

Визначимо інші капітальні витрати:

$$K_i = 0,02 * K_3 = 0,02 * 371335 = 7426,70 \text{ грн} \quad (8.12)$$

Загальні капітальні вкладення визначаються за формулою:

$$K = K_3 + K_{\text{ТТ}} + K_{\text{М}} + K_{\text{пр}} + K_i$$

$$\begin{aligned} K &= 371335 + 40846,85 + 63126,95 + 3000 + 7426,70 \\ &= 485735,50 \text{ грн} \end{aligned} \quad (8.13)$$

Амортизаційні відрахування приймаємо у розмірі 14,2% від загальної вартості капітальних вкладень:

$$C_a = 0,142 * K = 0,142 * 485735,50 = 68974,44 \text{ грн} \quad (8.14)$$

Витрати на ремонт і технічне обслуговування приймаємо у розмірі 18% від капітальних вкладень:

$$C_{\text{пр}} = 0,18 * K = 0,18 * 485735,50 = 87432,39 \text{ грн} \quad (8.15)$$

Визначимо витрати на електроенергію:

$$C_e = 25 * 2920 * 4,32 = 315360 \text{ грн} \quad (8.16)$$

Витрати на оплату праці обслуговуючого персоналу приймаємо:

$$C_3 = 86400 \text{ грн} \quad (8.17)$$

Отже, можемо визначити річні експлуатаційні витрати:

$$C = C_z + C_a + C_{\text{пр}} + C_e = 86400 + 68974,44 + 87432,39 + 315360 = 563748,50 \text{ грн} \quad (8.18)$$

Отже, річні експлуатаційні витрати становлять:

$$P = 563748,50 \text{ грн} \quad (8.19)$$

Визначимо зведені витрати:

$$B_{\text{зв}} = 563748,50 + 0,15 * 485735,50 = 636608,83 \text{ грн} \quad (8.20)$$

Для визначення строку окупності системи необхідно врахувати очікуваний річний економічний ефект. Він формується за рахунок зменшення витрат на оплату праці, раціонального використання електроенергії та зниження втрат продукції завдяки точнішому підтриманню режимів сушіння.

Приймаємо очікуваний річний економічний ефект:

$$R = 360000 \text{ грн} \quad (8.21)$$

Строк окупності визначається за формулою:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K}{R} \quad (8.22)$$

$$T_{\text{ок}} = \frac{485735,50}{360000} = 1,35 \text{ року} \quad (8.23)$$

У перерахунку на доби:

$$T_{\text{ок}} = 1,35 * 365 \approx 493 \text{ доби} \quad (8.24)$$

Виходить, що встановити автоматичну систему для сушіння зерна – це дійсно вигідно. Щоб її запустити, потрібно вкласти 485735,50 гривень. А потім щороку на її утримання йде 563748,50 гривень. Загалом, всі витрати за рік складають 636608,83 гривень. Але якщо врахувати, що завдяки системі ми економимо приблизно 360000 гривень щороку, то вона окупиться десь за 1,35 року, або, якщо точніше, за 493 дні.

ВИСНОВОК

У цій бакалаврській роботі було розроблено автоматичну систему, що керує сушінням зерна в шахтній сушарці, використовуючи сучасне обладнання від Schneider Electric. Спочатку ретельно було проаналізовано, як працює процес сушіння, вивчили особливості роботи самої сушарки і з'ясовано, які головні показники впливають на те, наскільки добре й ефективно сушиться зерно.

Створено математичну модель процесу сушіння зерна, яка допомогла нам побачити, як змінюються температура і вологість зерна, коли воно проходить крізь сушильну шахту. Завдяки цим результатам зрозуміло, як працює керований об'єкт, і визначено, як система реагує на зміни температури зерна. Це дозволило обґрунтувати, чому обрано саме такий алгоритм для автоматичного керування, та розроблено цифрову систему регулювання.

Щоб система працювала стабільно, було обрано ПІД-регулятор. Він дозволяє плавно регулювати параметри сушіння, зменшує похибки і покращує, як система реагує на зміни. Аналіз показав, що наша система працює стабільно, без сильних коливань, і повністю відповідає всім нашим вимогам до швидкості та точності регулювання.

Під час проєктування ми вибрали програмований логічний контролер, панель оператора, виконавчі пристрої, частотний перетворювач, вимірювальні датчики та все, що потрібно для мережевого зв'язку.

Крім того, розробили електричні схеми, схеми підключення та продумали, як буде виглядати шафа керування. Це допоможе системі надійно працювати в умовах сільськогосподарського виробництва.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Автоматизація технологічних процесів : підручник / О. М. Бондаренко, В. В. Ткаченко. — Київ : Вища школа, 2021. — 512 с.
2. Бойко В. С. Теорія автоматичного керування : навчальний посібник. — Львів : Новий Світ-2000, 2020. — 368 с.
3. Головка Д. Б. Мікропроцесорні системи керування технологічними процесами. — Харків : Факт, 2019. — 420 с.
4. ДСТУ Б А.2.4-16:2008. Автоматизація технологічних процесів. Умовні позначення приладів і засобів автоматизації на схемах. — Київ : Мінрегіонбуд України, 2009.
5. Єгоров О. В. Основи автоматизації виробничих процесів : навчальний посібник. — Київ : Центр учбової літератури, 2022. — 296 с.
6. Ковальчук П. І. Системи автоматичного регулювання : навчальний посібник. — Тернопіль : ТНТУ, 2021. — 334 с.
7. Кузьменко В. Г. Математичне моделювання технологічних процесів. — Дніпро : НГУ, 2020. — 287 с.
8. Ладанюк А. П. Автоматизація технологічних комплексів зернопереробних виробництв. — Київ : НУХТ, 2018. — 410 с.
9. Мартиненко І. І. Основи побудови автоматизованих систем керування. — Київ : Аграрна освіта, 2019. — 352 с.
10. Мельник С. В. Проектування систем автоматизації : навчальний посібник. — Вінниця : ВНТУ, 2021. — 305 с.
11. Олійник О. М. Програмовані логічні контролери в системах автоматизації. — Харків : ХНУРЕ, 2020. — 276 с.
12. Пупена О. М. Промислові мережі та інтеграційні технології в автоматизації. — Київ : Ліра-К, 2022. — 318 с.
13. Руденко В. С. Теорія автоматичного керування технічними системами. — Одеса : Астропринт, 2019. — 390 с.
14. Сажин Б. С. Процеси сушіння та сушильні установки : навчальний

- посібник. — Київ : Либідь, 2018. — 344 с.
15. Системи автоматизації технологічних процесів / за ред. А. П. Ладанюка. — Київ : НУХТ, 2021. — 455 с.
 16. Тарасенко О. П. Основи цифрових систем керування. — Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. — 280 с.
 17. Федоренко В. І. Електропривод та автоматизація промислових установок. — Харків : Основа, 2019. — 360 с.
 18. Хобін В. А. Автоматизація технологічних процесів харчових виробництв. — Одеса : Поліграф, 2021. — 402 с.
 19. Цапенко Є. А. Основи проектування систем керування. — Київ : Каравела, 2022. — 298 с.
 20. Штепа В. М. Автоматизація агропромислових комплексів. — Львів : Сполом, 2020. — 372 с.

ДОДАТОК А

Вихідні параметри для побудови перехідної та нормалізованої характеристики шахтної зерносушильної установки за каналом регулювання температурного режиму сушіння зернової маси.

Час t , с	Температура T , °C	$Y_H(t_i)$
0	15	0
600	26.83	0.285
1200	35.35	0.485
1800	41.47	0.63
2400	45.88	0.735
3000	49.05	0.811
3600	51.33	0.865
4200	52.97	0.904
4800	54.15	0.932
5400	55	0.952
6000	55.6	0.967
6600	56.05	0.977
7200	56.67	0.992
7800	57	1

ДОДАТОК Б

Йдеться про те, як правильно підібрати параметри для ПД-регулятора, щоб автоматизована система, яка сушить зерно в шахтній сушарці, працювала з потрібним нам рівнем коливань.

Спочатку беремо різні значення для інтегральної сталої часу (це такий параметр, що позначається як T_i). Потім, виходячи з цих значень, будемо амплітудно-фазову частотну характеристику для системи, яка поки що не замкнена.

При цьому для регулятора ми встановлюємо $K_i = 1$ і $T_i = \tau$. Далі на комплексній площині малюємо пряму лінію: вона йде від початку координат під кутом β , який вже заздалегідь показує, який рівень коливань нам потрібен від системи.

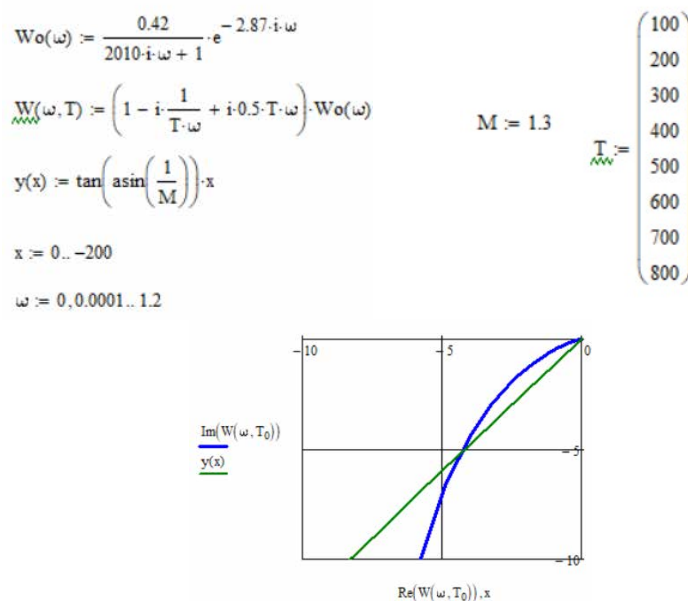


Рисунок 1

1. Виконуємо підбір параметрів кола таким чином, щоб воно одночасно мало точку дотику з побудованою прямою та годографом АФЧХ.

$i := 0..7$
 $R_i := \begin{pmatrix} 10 \\ 4.2 \\ 2.1 \\ 0.8 \\ 0.025 \\ 0.22 \\ 0.25 \\ 0.29 \end{pmatrix}$
 $x0_i := -R_i \cdot M \quad x0 = \begin{pmatrix} -13 \\ -5.46 \\ -2.73 \\ -1.04 \\ -0.033 \\ -0.286 \\ -0.325 \\ -0.377 \end{pmatrix}$

$$Y0(x) := -\sqrt{(R_0)^2 - (x - x0_0)^2}$$

$$Y6(x) := -\sqrt{(R_6)^2 - (x - x0_6)^2}$$

$$Y1(x) := -\sqrt{(R_1)^2 - (x - x0_1)^2}$$

$$Y7(x) := -\sqrt{(R_7)^2 - (x - x0_7)^2}$$

$$Y2(x) := -\sqrt{(R_2)^2 - (x - x0_2)^2}$$

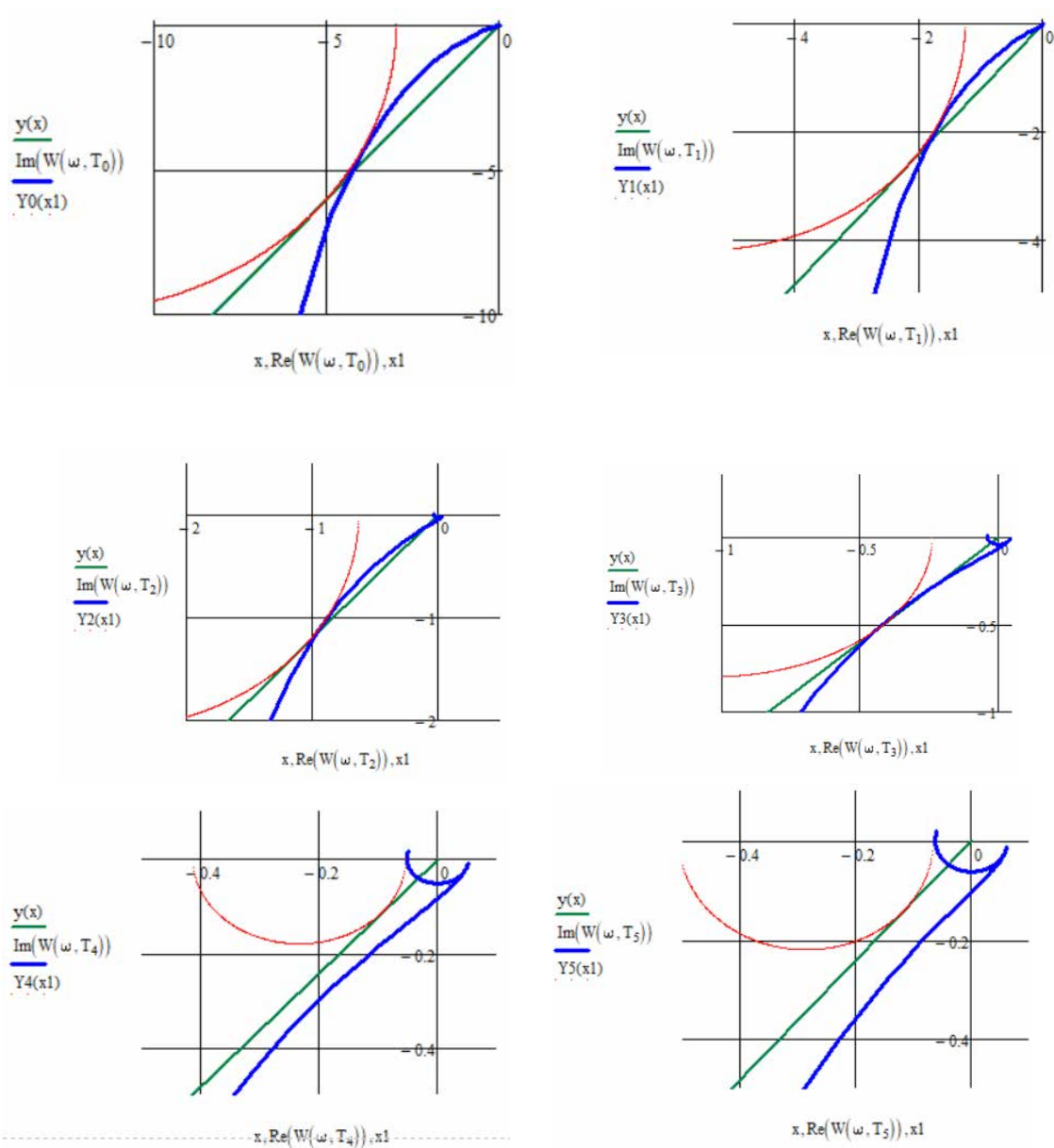
$$Y3(x) := -\sqrt{(R_3)^2 - (x - x0_3)^2}$$

$$Y4(x) := -\sqrt{(R_4)^2 - (x - x0_4)^2}$$

$$Y5(x) := -\sqrt{(R_5)^2 - (x - x0_5)^2}$$

 $x1 := 0, -0.001..-30$

Рисунок 2.1



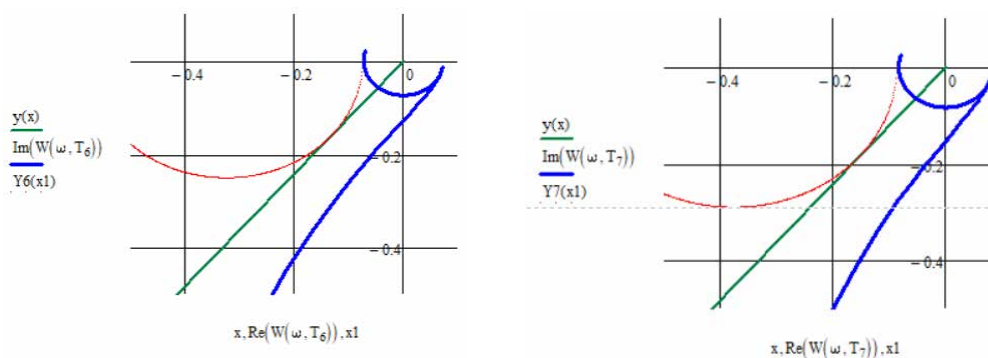


Рисунок 2.2

2. Ми беремо отримані значення радіусів і з них формуємо вектор коефіцієнтів підсилення K_p . Після цього будемо криву, що показує граничні співвідношення. Потім від початку координат проводимо пряму так, щоб вона торкалася опуклої частини цієї кривої. Координати саме тієї точки, де пряма доторкнулася кривої, дають нам найкращі налаштування для ПІД-регулятора, які відповідатимуть нашим вимогам щодо якості перехідного процесу.

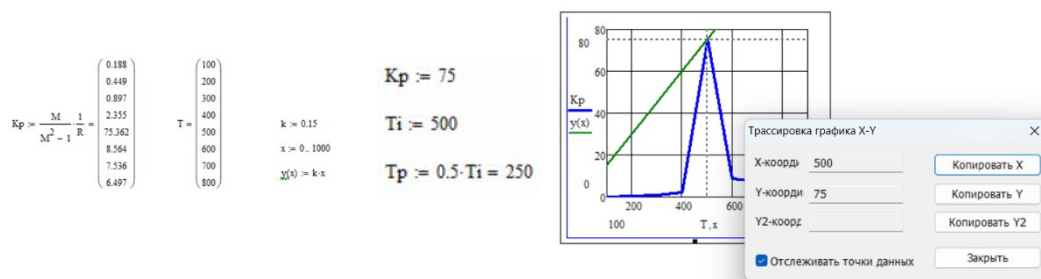


Рисунок 3