

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 681.5:664.3.033.6

ПОГОДЖЕНО

Директор ННІ енергетики,
автоматики і енергозбереження
(назва ННІ)

_____ В.В. Каплун
(підпис) (ПІБ)

« ____ » _____ 2025 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

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

_____ О.О. Опришко
(підпис) (ПІБ)

« ____ » _____ 2025 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

02.06.-КМР.2059"С".2024.11.18.006.ПЗ

на тему **«ДОСЛІДЖЕННЯ БАРАБАННОЇ ЗЕРНОСУШАРКИ ТА
РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО
РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРОЮ ТЕПЛОНОСІЯ
(ВП НУБІП УКРАЇНИ НДГ "ВЕЛИКОСНІТИНСЬКЕ")»**

Спеціальність:

174 – «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»
(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма:

Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
(назва)

Гарант освітньої програми

(підпис)

Лендел Т.І., к.т.н., доцент
(П.І.Б, науковий ступінь та вчене звання)

Виконав

(підпис)

Юзва Т.Р.
(П.І.Б студента)

Керівник магістерської роботи

(підпис)

Грищенко В.О., к.т.н.,
старший викладач
(П.І.Б, науковий ступінь та вчене звання)

КИЇВ-2025

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ

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

О.О. Опришко

« ____ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ

Юзві Тарасу Романовичу

(прізвище, ім'я, по-батькові)

Спеціальність:

174 – «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

Освітньо-професійна програма:

Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Тема магістерської кваліфікаційної роботи

**«ДОСЛІДЖЕННЯ БАРАБАННОЇ ЗЕРНОСУШАРКИ ТА
РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО
РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРОЮ ТЕПЛОНОСІЯ
(ВП НУБІП УКРАЇНИ НДГ "ВЕЛИКОСНІТИНСЬКЕ")»**,

затверджена наказом ректора НУБіП України 18.11.2024 року № 2059«С»

Термін подання студентом магістерської роботи 15.11.2025 року

Вихідні дані до роботи:

1. Завдання кафедри на дипломне проектування.
2. Матеріали аналізу і дослідження.
3. Наукова література з тематики магістерської роботи.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Дослідження барабанної зерносушарки, як об'єкта регулювання температури теплоносія.
2. Вибір комплексу технічних засобів автоматизації.
3. Оцінка економічної ефективності оптимальної системи регулювання температури теплоносія в барабанній зерносушарці.

Дата видачі завдання «19» листопада 2024 року

Керівник магістерської роботи _____

(Підпис)

Грищенко В.О.
(Прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання _____

(Підпис)

Юзва Т.Р.
(Прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Робота зосереджена на дослідженні зерносушарки як об'єкта управління, а також на розробці математичної моделі та системи автоматичного регулювання температурного режиму. Увага приділена вдосконаленню процесу сушіння та вибору оптимального технологічного підходу. Описано конструкцію та принцип роботи технологічного обладнання сушарки. Побудовано математичну модель теплогенератора, який виступає ключовим елементом у системі контролю температури.

У дослідженні особлива увага приділена перспективам розвитку автоматизації та електрифікації виробничих процесів. Проведений аналіз структурно-параметричної схеми дозволив дійти висновку про необхідність створення інтегрованої системи управління зерносушаркою як єдиним технологічним комплексом.

Запропоновано систему автоматичного регулювання температурного режиму повітря в сушарці, підбрано відповідне обладнання та розроблено принципову схему для автоматичного контролю, регулювання і захисту. Серед пріоритетних напрямів діяльності вчених і фахівців у галузі сільського господарства також виділяється вдосконалення способів і технологій зберігання свіжої плодоовочевої продукції. Актуальність цієї теми зумовлена необхідністю забезпечення населення та переробних підприємств якісними вітчизняними продуктами. Зазначені завдання можна вирішити шляхом формалізації процесів і залучення експертних знань, розробивши відповідний математичний апарат для моделювання й розрахунку важливих параметрів.

У роботі запропоновано методику моделювання технологічного процесу виконавчого механізму з електромагнітним клапаном.

Доцільність ухвалених технічних рішень підтверджено в економічному розділі роботи, де детально викладено кошторис витрат, пов'язаних із впровадженням нового регулятора.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ	7
1.1. Опис зерносушарки як об'єкта управління та стан його автоматизації.	7
1.2. Класифікація напрямків систем автоматичного управління зерносушильною технікою.	15
1.3. Мета і задачі автоматизації технологічного процесу сушіння зерна.	16
2. ДОСЛІДЖЕННЯ БАРАБАННОЇ ЗЕРНОСУШАРКИ, ЯК ОБ'ЄКТА РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ТЕПЛОНОСІЯ	18
2.1. Вдосконалення процесу сушіння та вибір технологічного процесу.....	18
2.2. Технологічне обладнання зерносушарки.....	21
2.3. Побудова та дослідження математичної моделі теплогенератора, як об'єкта управління температурними режимами.....	26
2.4. Експериментальне визначення передаточної функції.....	30
2.5. Вибір алгоритму управління та параметри настройки регулятора.....	34
2.6. Дослідження САР температури на стійкість.....	39
3. ВИБІР КОМПЛЕКСУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ	42
3.1. Обґрунтування та вибір вимірювальних датчиків температури.	42
3.2. Обґрунтування вибору виконавчого механізму з електромагнітним клапаном.....	43
3.3. Вибір алгоритму управління та технічних засобів для його реалізації.	47
3.4. Обґрунтування та вибір електротехнічного обладнання	50
3.5. Розрахунок і вибір пуско-захисної апаратури.....	51
3.5.1. Вибір автоматичного вимикача.....	52
3.5.2. Вибір електромагнітних пускачів.	53
3.6. Обґрунтування та вибір проводок.	54
4. ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ	56
ВИСНОВКИ	61
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	62

ВСТУП

Зерно, яке надходить від комбайнів, зазвичай має підвищену вологість — від 20 до 30%. Такий рівень вологості робить його непридатним для тривалого зберігання, оскільки надлишок вологи створює сприятливе середовище для розвитку мікроорганізмів та підвищення температури зерна. З огляду на це, зерно необхідно сушити до рівня вологості 14–16%, залежно від подальшого призначення.

Післязбиральну обробку зерна здійснюють на заготівельних підприємствах. Разом із тим на хлібоприймальні підприємства надходить продовольче зерно, яке вже пройшло попередню підготовку і доведене до базових або граничних стандартів якості.

Технологічний процес обробки продовольчого зерна складається з низки операцій, які забезпечують отримання якісної продукції. До таких операцій належать зважування сировини, попереднє очищення, вентилявання, сушіння, первинне та вторинне очищення, сортування, транспортування зерна і відходів, зважування готової продукції, обробка протравлювачами, транспортування і штабелювання в мішках, термічна дезінфекція, тривале зберігання в бункерах чи сховищах насипом або у мішкотарі.

За сучасної технології ці дії виконуються послідовно в одному потоці. Для цього використовуються машини та засоби механізації, інтегровані в технологічні лінії підприємств.

Класифікація підприємств для обробки зерна здійснюється за такими ознаками:

- призначення продукції: для продовольчого чи фуражного зерна, для обробки насіння або універсальні;
- культури, які обробляються;
- продуктивність: від 0,5 до 100 тонн на годину;
- зона використання: сухі чи вологі регіони.

Підприємства для післязбиральної обробки зерна належать до складних об'єктів управління. Це пояснюється значною кількістю машин для обробки зерна та наявністю численних факторів впливу на ефективність їх роботи. Обслуговуючий персонал часто не спроможний оперативно реагувати на випадкові збурення в роботі. Ручне управління потоковими машинами малоефективне: їх реальна продуктивність становить лише 60–70% номінальної. Спроби збільшити навантаження можуть призводити до погіршення якості готової продукції.

Автоматизація контролю та управління процесами обробки й зберігання зерна відкриває перспективи для значного підвищення ефективності роботи систем. Це дозволяє збільшити продуктивність технологічних ліній, зменшити трудові витрати й покращити якість зернової продукції.

1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

1.1. Опис зерносушарки як об'єкта управління та стан його автоматизації.

Основним елементом пункту післязбиральної обробки зерна, який значною мірою визначає вибір іншого обладнання, виступає сушарка.

Зерносушарка є найбільш складним об'єктом керування у всій лінії підготовки зерна до зберігання.

На сьогодні для сушіння зерна застосовують наступні типи сушарок: шахтні (СЗШ-16, М-819, С-20), барабанні (СЗПБ-2,5; СЗСБ-4,0; СЗСБ-8,0; СЗСБ-8А), бункерні (СБВС-5), карусельні (СЗК-5), конвеєрні (СКВС-6) та колонкові (СК-2, СК-5). Крім того, у господарствах на місцях виготовляються підлогові установки (площадки) і так звані "ромбічні" сушарки різних модифікацій. Для комплектування останніх промисловість випускає топкові блоки та теплогенератори (ТБ-0,75; ТБ-1,5; ТАУ-0,75; ТАУ-1,5; ТГ-1; ТГ-2,5; ТГ-150 тощо).

За принципом дії барабанні сушарки здебільшого відносять до конвективних апаратів. Контактне сушіння, що відбувається внаслідок зіткнення матеріалу із нагрітою поверхнею барабана, має незначний вплив. Через це схеми регулювання барабанних сушарок багато в чому схожі на системи автоматичного регулювання (САР) для стрічкових, конвеєрних і тунельних сушарок. Як і в САР інших сушарок, у барабанних сушарках через відсутність автоматичних вологомірів як регульовані параметри найчастіше використовують непрямі показники, переважно температуру теплоносія.

Регулювання температури теплоносія передбачає низку спрощень. Припустимо, що тепловтрати, пов'язані з охолодженням барабана, нагріванням матеріалу та його вологи (особливо в першому періоді сушіння), можна знехтувати, а питому теплоємність теплоносія вважати стабільною. У цьому випадку для визначеного перетину барабана на відстані у від входу можна скласти рівняння: ліва частина описує витрачене тепло теплоносія, а права — обсяг тепла,

необхідного для випаровування вологи з матеріалу, що пройшов цю відстань уздовж осі барабана. Таким чином, зміна температури теплоносія вздовж довжини барабана при відповідному коефіцієнті масштабування k співпадає зі зміною абсолютної вологості матеріалу, зменшеної на постійну величину A . Барабанна сушарка належить до класу об'єктів автоматичного керування зі значними сталими часу, розподіленими параметрами і серйозним часовим запізненням, викликаним тривалістю проходження матеріалу через весь барабан. Це запізнення може досягати однієї години. У зв'язку з цим застосування таких параметрів, як температура теплоносія чи вологість матеріалу на виході із сушильного барабана, для регулювання часто є недоцільним. Доцільніше використовувати температуру теплоносія у такому перетині барабана, де запізнення мінімальне і вже випарувався значний обсяг вологості. Це дозволяє оцінити поточний стан процесу сушіння в установці.

При лінійному законі зміни коефіцієнта сушіння вздовж довжини апарата ключовим перетином є точка сушарки на відстані $1/3$ від входу матеріалу, де L - загальна довжина апарата. У реальних сушарках, крім збурень, що впливають на весь сушильний простір одночасно, існують також локальні збурення. Їх виникнення може бути спричинене зміною розподілу матеріалу або гідродинамічних умов його обтікання сушильним агентом у різних ділянках простору. Саме тому управління процесом сушіння тільки за даними одного датчика виявляється менш ефективним порівняно з використанням усередненої інформації кількох датчиків, розташованих у різних частинах сушильного простору. Для барабанних сушарок, коли це можливо, доцільно впроваджувати розподілений контроль.

Температуру теплоносія можна регулювати через зміну кількості матеріалу, що подається до барабана, або зміну обсягу тепла, яке вводиться в апарат. Однак зміна витрати палива для забезпечення процесу сушіння прямо пов'язана з продуктивністю апарата. Тому в умовах комплексної автоматизації виробництва регулювання процесу сушіння шляхом коригування обсягу матеріалу на вході в барабан є технологічно складним завданням.

Окрім того, для виконання такого регулювання необхідно було б створити спеціальні дозуючі пристрої, здатні забезпечити точне підтримання заданої миттєвої витрати матеріалу незалежно від його властивостей та розмірів. Хоча для гранульованих матеріалів такі системи дозування вже існують, їх розробка для матеріалів із неоднорідною структурою, змінними формою та консистенцією є складною і часто недосяжною. Це ще одна причина, яка обмежує застосування механізму керування процесом сушіння шляхом впливу на дозування матеріалу.

Таким чином, регулювання кількості матеріалу, що подається в барабан, можна використовувати лише за умови наявності високоточних дозуючих механізмів та роботи сушарки поза межами безперервного виробничого циклу. Водночас необхідно враховувати великий часовий лаг у системі керування, який виникає через тривалий час перебування сировини в барабані (до однієї години).

Регулювання кількості тепла, яке подається в барабан, можливе завдяки зміні обсягу теплоносія, його температури при вході до апарата або корегування обох параметрів одночасно. При цьому слід враховувати обмеження верхніх меж витрати теплоносія та його температури. Надмірне збільшення швидкості потоку теплоносія може спричинити сильне запилення, а надмірне підвищення температури може бути небезпечним або викликати розкладання сушеного матеріалу.

Як теплоносій в барабанних сушарках застосовується або повітря, що підігрівається в калорифері, або димові гази, які утворюються в топці. Різноманітні варіанти автоматизації роботи барабанних сушарок представлені на рис. 1.1-1.3.

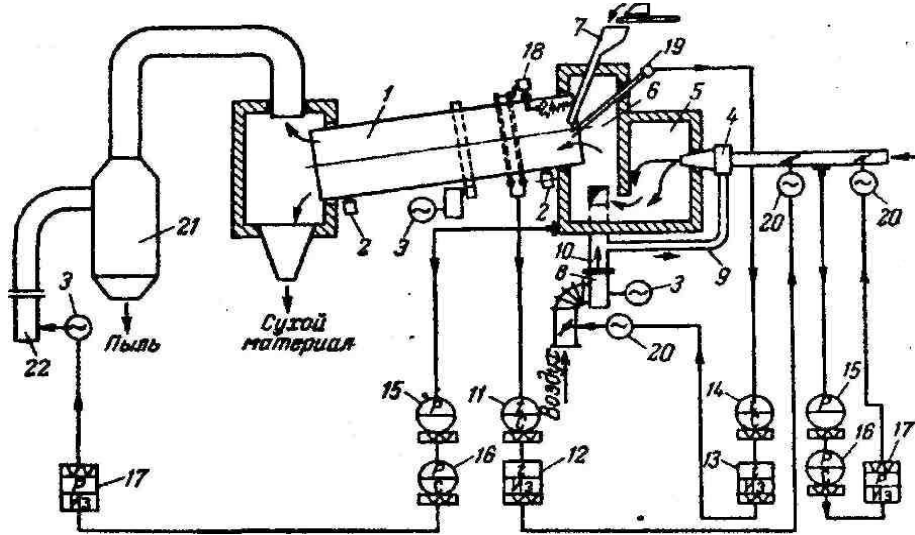


Рис. 1.1. Схема автоматизації барабанної сушарки з газовим обігрівом.

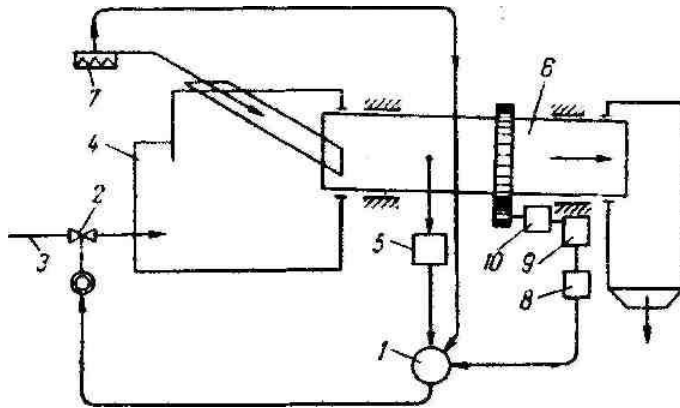


Рис. 1.2 Схема автоматизації барабанної сушарки з корекцією по загрузці барабана.

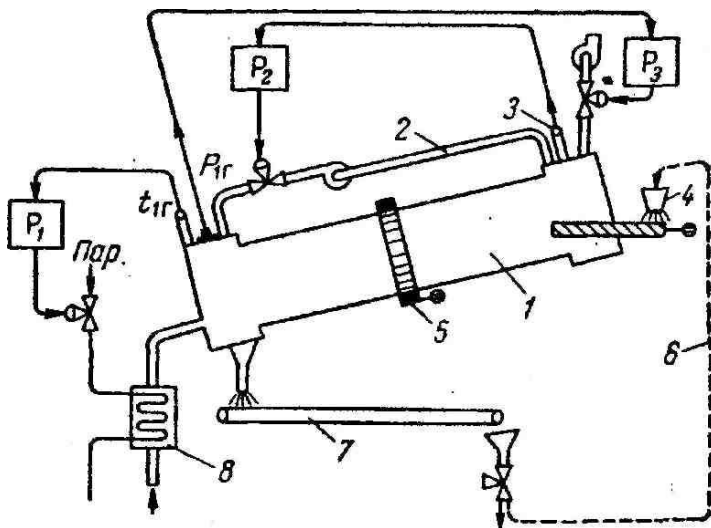


Рис. 1.3. Блок-схема автоматичного регулювання барабанної сушарки.

Регулювання температури на вході до барабана здійснюється шляхом коригування подачі палива в пальник (форсунку).

1 - барабан, 2 - лінія рециркуляції повітря, 3 - мокрий термометр, 4 - бункер матеріалу, 5 - привід барабана, 6 - лінія рециркуляції матеріалу, 7 - конвеєр, 8 - повітропідігрівач, P1 і P2 - регулятори температури, P3 - регулятор тиску.

Для барабанних сушарок, що належать до об'єктів із розподіленими параметрами та значним чистим запізненням, яке в багатьох випадках значно перевищує значення постійних часу, створити систему автоматичного регулювання з необхідною якістю регулювання виявляється надзвичайно складно. Як вже зазначалося раніше, у таких умовах традиційні методи часто не забезпечують бажаного результату.

У випадках, коли сушарки мають великий час проходження матеріалу й існують підвищені вимоги до якості регулювання, використовувані системи автоматичного регулювання часто є недостатньо ефективними. У таких ситуаціях доцільно застосовувати більш складні системи автоматизованого управління, засновані на використанні обчислювальних машин.

На рис. 1.4 показана САУ процесом сушіння мідно-цинкової шахти.

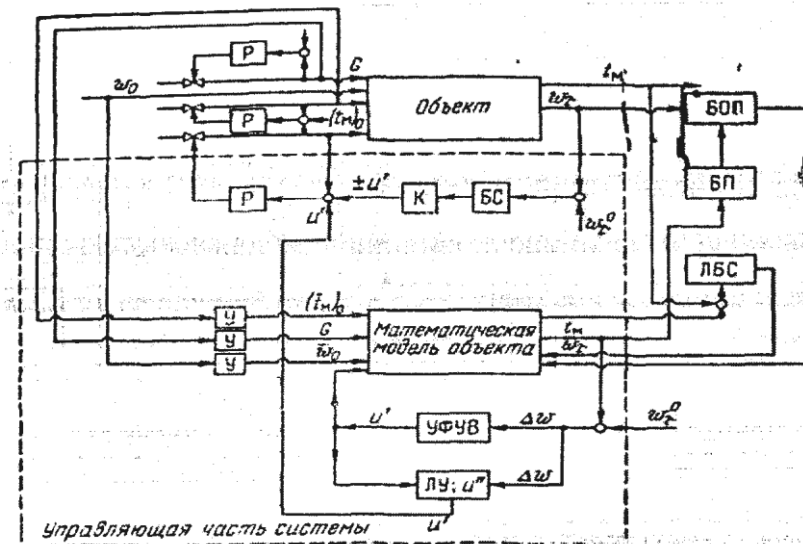


Рис. 1.4. САУ процесом сушіння мідно-цинкової шахти.

Дана система охоплює такі компоненти:

1. Контур стабілізації витрати теплоносія, для якого використовується Пі-регулятор, що забезпечує відсутність статичної похибки.

2. Математична прогнозуюча модель процесу сушіння шихти, призначена для передбачення поведінки системи. Вона працює таким чином, щоб вхідні параметри об'єкта змінювалися на незначну величину протягом часу визначення керуючої дії.

3. Пристрій формування керуючого впливу (УФУВ), який визначає значення впливу, що задається регулятором витрати теплоносія.

4. Логічний пристрій (ЛУ), відповідальний за передавання керуючого впливу з обчислювального блоку на об'єкт у випадках, коли цей вплив забезпечує відсутність відхилення контрольованого параметра від встановленого значення.

5. Блок самоналаштування (БС), призначений для уточнення параметрів моделі об'єкта.

6. Усереднювальний пристрій (В), який виділяє основний сигнал та послаблює випадкові флуктуації.

7. Коригувальний пристрій (ДО), що уточнює керуючий вплив залежно від кінцевої вологості шихти.

8. Контур стабілізації температури теплоносія на вході у піч.

9. Контур стабілізації подачі шихти до печі.

10. Блок пам'яті (БП), який зберігає попередні значення основного параметра — вологості. Принцип роботи системи передбачає таке: початкові значення вологості, витрати шихти та температури теплоносія, отримані від відповідних датчиків, передаються у вигляді імпульсів до усереднювального пристрою. Усереднення вхідних даних здійснюється за рівнянням:

$$\gamma = \frac{1}{\tau_0} \int_0^{\tau_0} \gamma(\tau) d\tau \quad (1.3)$$

Час інтегрування, або усереднення τ_0 , має бути достатнім для усунення випадкових флуктуацій і обмежуватися точністю вимірювання змінної, тобто γ не повинно сильно відрізнятись від $\gamma(\tau)$ і впливати на точність встановлення

керуючого впливу. Водночас слід забезпечити, щоб величина τ_0 відповідала часу, необхідному для пошуку рішення керуючою частиною, або перевищувала його.

Середні значення змінних вводяться в математичну модель процесу, яка є складовою частиною керуючого пристрою та описується такими рівняннями:

$$\bar{\omega}_\tau = f_1(u) \quad \bar{\omega}_\tau = f_2(\bar{\omega}_0) \quad \bar{\omega}_\tau = f_3(G) \quad \bar{\omega}_\tau = f_4(t_M)_0 \quad (1.4)$$

Якщо отримання цих рівнянь є складним завданням, можна використати динамічну модель, яка функціонує в пришвидшеному часовому режимі. На виході такої моделі генерується значення $\bar{\omega}_\tau$, що рівняється із заданим значенням $\bar{\omega}_\tau^0$. Величина помилки $\Delta\bar{\omega}_\tau = \bar{\omega}_\tau - \bar{\omega}_\tau^0$, надходить в УФУВ, що здійснює вибір відповідного u'_{max} , щоб $\Delta\bar{\omega} = 0$.

УФУВ може виступати звичайним оптимізатором, у якому математична модель слугує об'єктом, оскільки $(\Delta\bar{\omega})^2 = f(u')$ має вигляд, зображений на мал. 1.7.

Ця функція володіє одним мінімумом $\Delta\bar{\omega} = 0$, що зміщається уздовж осі абсцис при різних значеннях $G, W_0, (t_M)_0$. Якщо подібний оптимізатор здається надто складним, можна реалізувати УФУВ у формі крокового шукача (КШ) та логічного блока, що активує шукач і зупиняє його після завершення пошуку. Увесь діапазон змін керуючого впливу поділяється на окремі ділянки. $\Delta u'_1$, їхні значення залежать від точності розв'язання. Кроковий шукач вводить у модель значення напруги, пропорційне $\sum \Delta u'_1$, доти, поки $\Delta\bar{\omega}$ не стане рівною нулю. Величина u' надходить у логічний пристрій, у який одночасно подається величина помилки $\Delta\bar{\omega}$.

Рівняння логічного пристрою досить просте:

$$u' = u' \wedge \Delta\bar{\omega} \quad (1.5)$$

сигнал u' проходить у пристрій, що задає, регулятор витрати теплоносія коли $\Delta\bar{\omega} = 0$.

Таким чином, обчислювальний пристрій формує вплив на регулятор витрати теплоносія у вигляді ступінчастої функції з визначеним періодом τ_0 .

У зв'язку з тим, що зазвичай складно (а іноді практично неможливо) отримати математичну модель, яка б адекватно відображала динамічні та статичні

властивості процесу, що призводить до помилок у визначенні керуючого впливу, у систему вводиться коригувальний контур. Цей контур складається з коригувального пристрою та блоку запізнювання.

Рівняння для контуру записується наступним чином:

$$u''(p) = k_{\text{exp}}(-p\tau)[\omega \cdot (p) - \omega^0(p)] \quad (1.6)$$

де k — коефіцієнт пропорційності; $\Delta\omega(p) = \omega^0(p)$ — відхилення керованої змінної від заданого значення; $\exp(-p\tau)$ — передатна функція блоку запізнювання, причому $\tau = \tau_0$.

Як бачимо з рівняння (1.3), що коректує пристрій виробляє сигнал u'' , пропорційний відхиленню $\Delta\omega(\tau)$, компенсуючи тим самим погрішності математичної моделі й пошуку самого рішення. Алгебраїчна сума сигналів $u = u' + u''$ надходить у пристрій, що задає, регулятора витрати, що відпрацьовує значення u .

Система стабілізації витрати теплоносія характеризується високою швидкодією, тому динаміку встановлення заданого значення G можна не враховувати, спрощуючи модель і розглядаючи цей контур як статичну ланку. Таким чином, динаміку всієї системи автоматичного управління процесом сушіння визначає лише динаміка самого об'єкта.

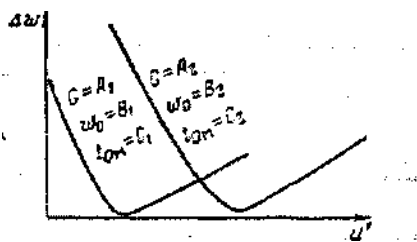


Рис. 1.5 Графік залежності $\Delta\omega = u'$

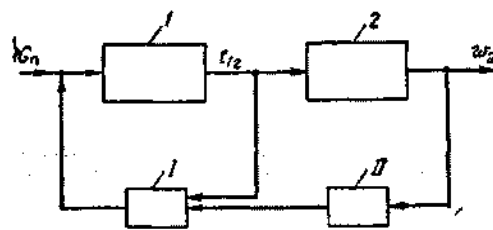


Рис. 1.6 Структурна схема каскадної САР:
1 — калорифер; 2 — сушарка.

1.2. Класифікація напрямків систем автоматичного управління зерносушильною технікою.

Перший напрям.

Системи автоматизованого управління процесом сушіння зерна з контролем та регулюванням параметрів сушильного середовища.

Ці системи стабілізують температуру $\Theta_{\text{тп}}$ сушильного агента на вході до камери сушіння, а за низьких показників — рівень відносної вологості повітря ϕ . Системи стабілізації $\Theta_{\text{тп}}$ та ϕ отримали широкий розповсюдження завдяки своїй простоті та надійності в роботі. Хоча вони не сприяють прискоренню процесу сушки, проте забезпечують умови для збереження якості зерна на високому рівні.

Другий напрям.

Системи автоматизованого управління процесом сушки, що базуються на показниках сушильного агента та параметрах зерна.

Ці системи є логічним продовженням попередніх розробок. Найпростіші з них контролюють виключно температуру зерна, тоді як складніші моделі здатні регулювати і рівень вологості. Системи управління температурою Θ_z відмінні від попередніх додатковим контролем параметра Θ_z . Це забезпечує автоматичний захист зерна від перегріву. При $\Theta_z \geq \Theta_{\text{здоп}}$, Команда передається виконавчому механізму, який знижує подачу палива. Нижній рівень нагріву зерна при цьому не регулюється.

Третій напрям.

Системи, що оптимізують процес сушки або підтримують режим, близький до оптимального.

До таких систем належать ті, що використовують електронно-обчислювальні машини (ЕОМ), а також системи з елементами адаптації чи програмним управлінням, налаштованим на попередньо обчислені оптимальні залежності.

При виборі сушарок для реконструкції пункту післязбиральної обробки рекомендується враховувати середнє сезонне навантаження на відповідний агрегат. Нормативне навантаження для сушарки СЗСБ-8 становить 2000 тонн за

сезон. Однак слід мати на увазі, що цей показник розрахований для однолінійного пункту. У насінницькому господарстві, де структура посівів включає кілька культур і сортів, може виникнути необхідність створення кількох ліній із меншою продуктивністю для кожної з них окремо. Використання пунктів із сушарками продуктивністю понад 8 тонн виправдане лише на міжгосподарському рівні.

Для обробки продовольчого та фуражного зерна зернових і зернобобових культур застосовуються зерноочисні агрегати типу ЗАВ або зерноочисні комплекси типу КЗС різної продуктивності. Найбільш популярними є зернообробні комплекси КЗШ-20Ш, КЗС-20Б, КЗС-25Ш, КЗС-25Б та КЗС-50. У потокових лініях таких комплексів зазвичай використовують зерносушарки СЗШ-16 і СЗСБ-8.

1.3. Мета і задачі автоматизації технологічного процесу сушіння зерна.

Мета автоматизації полягає у підвищенні продуктивності роботи зерносушильного комплексу, покращенні якості продукції та усуненні недоліків технологічного процесу. Зокрема, це стосується вдосконалення регулюючих механізмів, за рахунок керування якими можна мінімізувати вплив зовнішніх факторів. До основних проблем, що існують у виробництві зернообробного обладнання, належить брак ефективних засобів контролю технологічних параметрів, таких як вологість, чистота та витрата зерна.

Сьогодні особливо актуальним є питання підвищення ефективності виробництва, зниження витрат та раціонального використання всіх видів ресурсів, що стосується також і зерносушильного обладнання.

Покращити коефіцієнт інтенсивного використання зерносушарки можна шляхом застосування сучасних режимів сушіння, чіткого дотримання встановлених параметрів, впровадження ефективного контролю ключових характеристик та забезпечення оперативного управління.

Одним із шляхів підвищення ефективності роботи зерносушарок без значних капіталовкладень є удосконалення режимів функціонування та технологічних схем. Це забезпечує стабільну й надійну роботу обладнання, передбачаючи усунення причин перегріву зерна, оптимізацію роботи регулюючих пристроїв із мінімально необхідною кількістю точок контролю та управлінських заходів.

Аналіз чинників, що впливають на ефективність функціонування потокових ліній з обробки зерна, з позиції управлінських задач, вказує на необхідність автоматизації зернообробних підприємств. Окрім розглянутих технічних аспектів, велике значення мають і організаційні фактори, зокрема своєчасне й безперервне постачання та транспортування зерна, належна організація паливного й електричного живлення, а також своєчасне технічне обслуговування обладнання. Основним завданням автоматизації технологічного процесу є не лише зниження енергоспоживання, а й підвищення якості обробленого зерна на виході з сушильної установки.

Метою цієї роботи є розробка системи автоматичного регулювання процесу сушки зерна в барабанній сушарці. Це передбачає контроль температури сушильного агента та оптимізацію використання енергоресурсів для досягнення високої продуктивності й збереження необхідних якісних показників зернової маси.

2. ДОСЛІДЖЕННЯ БАРАБАННОЇ ЗЕРНОСУШАРКИ, ЯК ОБ'ЄКТА РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ТЕПЛОНОСІЯ

2.1. Вдосконалення процесу сушіння та вибір технологічного процесу.

Окремі зерна щойно зібраного врожаю мають нерівномірну вологість, через що вони швидко самозігріваються та пліснявють. Вже за кілька годин температура зерна помітно підвищується, а через кілька днів може сягати 40-45°C. З метою уникнення цих процесів доцільно попередньо сортувати зерно, враховуючи його пружні властивості. Нерівномірність у вологості зерна стане причиною самосортування під час завантажувально-розвантажувальних операцій, особливо при наповненні зерносушильних шахт, вентильованих засіків чи інших ємностей. Це важливий фактор, який слід враховувати при виборі оптимального режиму сушіння. Оскільки термостійкість зерна залежить від початкового рівня його вологості, для збереження посівних властивостей необхідно обирати найнижчу температуру сушильного агента, яка враховує термостійкість зерен із найвищим вмістом води.

Здатність зерна віддавати вологу, а також характер зміни його вологості залежать від структури і питомої площі поверхні випаровування. Процес сушіння зерна протікає переважно у фазі зниження швидкості сушіння. Цей етап характеризується максимальною швидкістю вологообміну, але в міру просування зони випаровування всередину зерна сушіння сповільнюється. Це пояснюється тим, що частина теплової енергії витрачається на руйнування зв'язку між водою і речовиною зерна, а також на переміщення води всередині. Чим нижча вологість стає, тим сильніше зміцнюється цей зв'язок, що призводить до подальшого зменшення швидкості сушіння, особливо при досягненні рівноваги між вологістю зерна та вологістю повітря, яке проникає крізь нього.

У процесі сушіння тепло передається на поверхню зерна, швидко нагріваючи його до температури сушильного агента. Проте нагрівання можливе лише до певної межі, яка визначається термостійкістю білкових сполук у зерні.

Гранично допустима температура нагрівання залежить від виду культури, початкової вологості зерна, температури навколишнього середовища та тривалості теплової обробки. Параметри максимально допустимої температури нагрівання для різних культур наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. Гранично допустима температура нагрівання зерна

Вологість, %	16	17	18	19	20	21	22	23
Пшениця, °С	55	52	49	46	43	40	37	36
Жито, °С	65	62	59	56	53	50	47	43
Кукурудза, °С	75	70	65	53	58	55	52	47

Під час сушіння зерна таких культур, як пшениця, жито, ячмінь та овес у барабанних зерносушарках, встановлюють гранично допустиму температуру теплоносія в межах 110-130°C. Температура нагрівання продовольчого зерна може бути на 8-10°C вищою, а температура теплоносія — на 15-20°C вищою, ніж для зерна, призначеного на насіння.

Контроль фактичної температури нагрівання зерна в процесі сушіння, особливо в умовах використання гарячого повітря, є складним завданням через постійні зміни температурних і вологісних показників зерна. Параметри сушильного агента, що проходить через шар зерна, змінюються внаслідок поглинання води і охолодження. Через це частина зерна починає сушитися при вихідних параметрах, тоді як нижні шари вже висохли. Через короткий час сушіння температура зерна у зоні подачі сушильного агента і самого агента наближаються одна до одної. Тому температура нагрівання зерна визначається шляхом контролю температури сушильного агента.

Барабанні зерносушарки мають свої специфічні закономірності роботи. У міру просування зерна по установці воно потрапляє у зони, які недостатньо обробляються сушильним агентом, що призводить до періодичного підсушування

окремих ділянок. Враховуючи термостійкість насіння і необхідний рівень вилучення вологи, критично важливо підтримувати суворий контроль температури нагрівання зерна та параметрів сушильного агента. Також потрібно забезпечувати стабільну продуктивність роботи сушильної установки і правильно розраховувати тривалість експозиції залежно від початкової вологості матеріалу.

Енергоефективність є одним із ключових критеріїв оцінки рівня зерносушильного обладнання. Наприклад, для сушіння пшениці продовольчого призначення з початковою вологістю 20% до кінцевої 14%, сучасні вітчизняні зерносушарки потребують витрату тепла на видалення одного кілограма вологи обсягом 1250-1400 ккал/кг. Це відповідає ККД установок у межах ~0,42-0,5. Проте можливості збільшення ККД сушильної установки є обмеженими.

Загальну витрату тепла на випаровування одного кілограма вологи можна представити за певною формулою:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4, \quad (2.1)$$

де Q_1 — кількість тепла, теоретично необхідна на випаровування 1 кг вологи та нагрів її у вигляді пари до температури теплоносія, що відпрацював;

Q_2 — кількість тепла, необхідна на нагрів вологого матеріалу, із якого випаровують 1 кг вологи;

Q_3 — кількість тепла, необхідна на нагрів сухої частини повітря від температури навколишнього середовища до температури повітря, що відпрацювало;

Q_4 — втрати в навколишнє середовище.

Середні величини компонентів витрати тепла на 1 кг випаровуваної вологи визначаються наступними цифрами:

$$Q_1 = 600 \text{ ккал/кг вип. вол}; \quad Q_2 = 250 \text{ ккал/кг вип. вол};$$

$$Q_3 = 420 \text{ ккал/кг вип. вол}; \quad Q_4 = 30 \text{ ккал/кг вип. вол}.$$

Зниження величини Q може бути досягнуто в основному за рахунок Q_3 , шляхом рециркуляції теплоносія, що відпрацював.

2.2. Технологічне обладнання зерносушарки.

З огляду на матеріал, поданий у попередніх розділах, найефективніше використовувати автоматизацію для барабанної зерносушарки СЗСБ-8. Ця модель дозволяє досягти бажаного результату реконструкції без значних фінансових витрат.

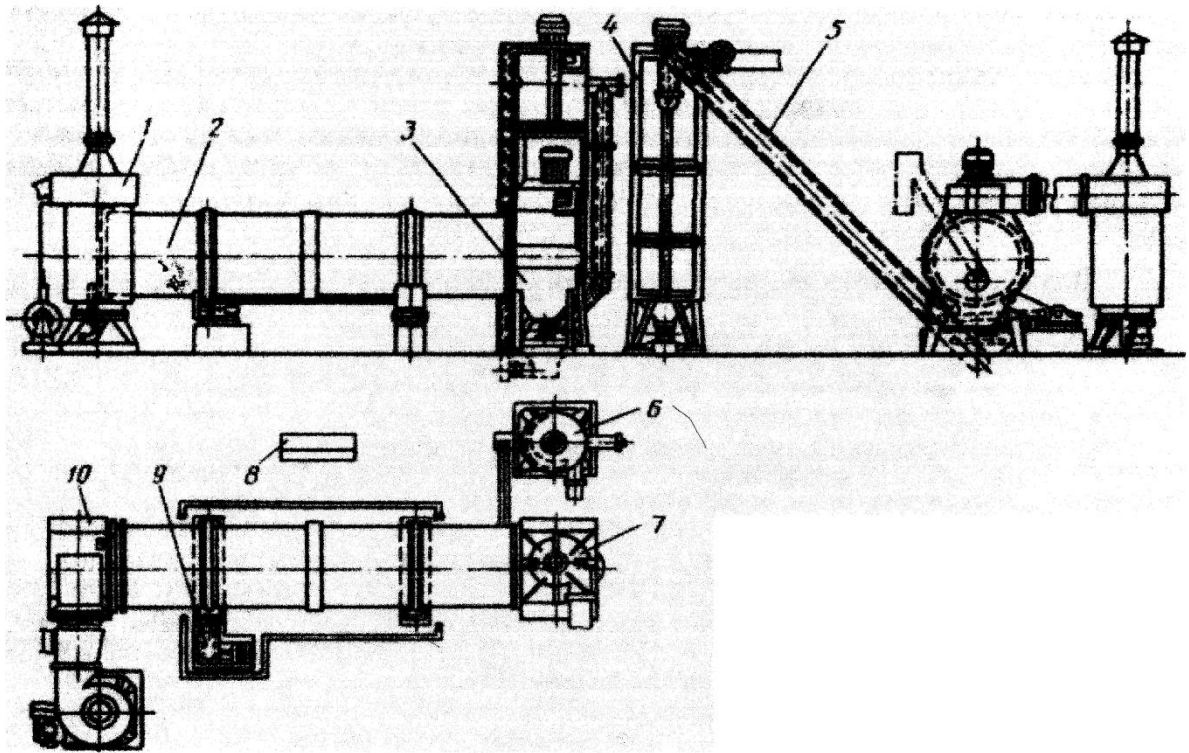


Рис. 2.1. Зерносушарка СЗСБ-8.

1 — топка; 2 — сушильний барабан; 3 — розгрузочна камера; 4 — охолоджувальна колонка; 5 — розвантажувальний елеватор; 6 — вентилятор охолоджувальної колонки; 7 — вентилятор сушильного барабана; 8 — пульт керування; 9 — привідний механізм; 10 — завантажувальна камера.

Барабанна зерносушарка СЗСБ-8 використовується для сушіння насінневого, продовольчого та фуражного зерна, включаючи зернові, зернобобові та олійні культури. Головною складовою таких сушарок є горизонтальний або трохи нахилений обертовий барабан, частота обертання якого становить 2-6 об/хв. Усередині цього циліндричного барабана зерно переміщується вздовж його довжини і проходить процес сушіння. Залежно від типу продукту, що

обробляється, всередині барабана встановлюються різноманітні насадки чи поздовжні лопаті, які сприяють пришвидшенню та ефективності сушіння.

Основною особливістю барабанних сушарок є їхня здатність до видалення вологи, що визначається як інтенсивність випаровування на одиницю об'єму барабана, тобто кількість вологи, яку можна випарувати з 1 м³ об'єму барабана. Рівень вологонапруженості визначається типом, рівнем заповнення та частотою обертання барабана, теплофізичними характеристиками й розмірами зерна, а також температурою, вологістю і швидкістю руху агента сушіння всередині барабана. Її значення варіюється в діапазоні від 6,0 до 44,0 кг исп. вл./ (м³ • ч). Витрата теплоти складає від 5230 до 12500 кДж исп. вл. (від 1250 до 3000 ккал исп. вл.), а витрата електроенергії від 0,1 до 0,2 квт ч/кг исп. вл.. Зерносушарка СЗСБ-8 включає в себе такі основні компоненти: топку, завантажувальну камеру, сушильний барабан, розвантажувальну камеру, охолоджувальну колонку, розвантажувальну норію, вентилятор охолоджувальної колонки, вентилятор сушильного барабана, завантажувальну норію та приводний механізм.

Завантажувальна камера монтується поруч із переднім краєм сушильного барабана й призначена для подачі агента сушіння та сирого зерна до барабана. У верхній частині камери розташований патрубковий з'єднує її з трубопроводом для подачі агента сушіння. Дно камери має конусну форму й оснащено спеціальним клапаном-блимавкою, через який можна видаляти надлишок сирого зерна.

Передня стінка камери обладнана отвором для термометра, що використовується для вимірювання температури агента сушіння. До задньої стінки приварений кутковий фланець, який забезпечує кріплення ущільнення сушильного барабана. Камера також має люки зі знімними кришками на передній і бічній стінках для зручності доступу.

Сушильний барабан побудований у шістьох секціях і оснащений підйомно-лопатною системою. Хрестовина барабана складається з чотирьох знімних частин. У його передній конусній частині розташовані шість гвинтових доріжок, які направляють зерно до різних секторів. Також у тильній частині барабана

передбачені доріжки для відведення зерна. Закінчення сушильного барабана оснащено конусним патрубком, до якого через зовнішній фланець кріпиться знімне підпірне кільце з шістьма люками. По ободу барабану встановлено два бандажі, які спираються на металеві ролики, забезпечуючи його обертання.

Розвантажувальна камера відповідає за відведення відпрацьованого агента сушіння та вивід висушеного зерна. Відведення зерна та його розвантаження здійснюється безперервно через шлюзовий затвор, розташований у нижній частині конусного днища камери. Привод цього затвора забезпечується електродвигуном у парі з редуктором. Відпрацьований агент сушіння видаляється вентилятором, що розташований над камерою.

Охолоджувальна колонка є вертикальною конструкцією, що складається з двох циліндрів. Основна частина зовнішнього (нижнього) циліндра має перфорацію, тоді як верхня частина виконана з суцільного матеріалу. Простір між циліндрами утворює резервуар для зерна, де здійснюється його охолодження за рахунок просмоктування повітря через шар зерна. Повітря для охолодження подається через отвори у зовнішньому циліндрі.

До верхньої частини внутрішнього циліндра підключений всмоктувальний патрубок вентилятора, який забезпечує видалення відпрацьованого повітря. Конусне дно колонки закінчується шлюзовим затвором, що приводиться в дію електродвигуном. Робота затвора є періодичною: його увімкнення активується датчиком верхнього рівня, коли зерно досягає максимальної позначки. Вимикання затвора відбувається завдяки датчику нижнього рівня, розташованому у верхній частині колонки. Вся конструкція встановлена на станині, до складу якої входить бункер для накопичення зерна.

Вентилятор моделі Ц4-70 №7 сушильного барабана обладнаний колесом з 12 плоскими лопатями. Вхідний патрубок має плавну форму колектора, завдяки чому забезпечується рівномірний потік повітря. Обертання колеса вентилятора відбувається в горизонтальній площині, а привід здійснюється від фланцевого електродвигуна вертикального виконання. На вихлопному патрубку вентилятора

розташований дросель, що дозволяє регулювати загальну витрату сушильного агента.

Щодо вентилятора Ц4-70 №6, застосованого в охолоджувальній колонці, його конструкція аналогічна вентилятору сушильного барабана. Він також знаходиться у верхній частині колонки, а в його вихлопному патрубку є дросель для регулювання витрати повітря, яке використовується для охолодження зерна.

Приводний механізм сушильного барабана включає електродвигун потужністю 7,5 кВт із частотою обертання ротора 1440 об/хв, двоступінчастий редуктор РМ-350 та систему передачі руху на ролики, які безпосередньо приводять у дію бандажі сушильного барабана. Керування всіма елементами системи здійснюється дистанційно за допомогою станції керування, де зосереджена відповідна апаратура для запуску, контролю та захисту роботи обладнання.

Принципова технологічна схема роботи сушарки представлена на малюнку. Зерно через завантажувальну камеру потрапляє до сушильного барабана зерносушарки СЗСБ-8. Тут лопатки барабана та хрестовини підхоплюють його, підіймають угору, після чого зерно осипається вниз і переміщується вздовж барабана. Агент сушіння, проходячи через барабан, омиває зерно, яке падає з полиць, та здійснює його висушування. Робота сушарки відбувається під розрідженням, щоб запобігти витoku агента сушіння через можливі нещільності. З'єднання обертового барабана із завантажувальною та розвантажувальною камерами виконано за допомогою лабіринтових ущільнень.

Для створення потрібного заповнення барабана використовується підпір зерна на виході, який забезпечується колодязем з люками. Люки відкривають тільки після завершення сушіння всієї партії зерна, звільняючи барабан повністю. Наповнення барабана вологим зерном має бути максимальним і становити приблизно 20–25% його об'єму. Недостатнє заповнення негативно впливає на продуктивність сушарки, призводить до перегріву зерна у процесі сушіння.

Відпрацьований агент сушіння виводиться вентилятором, розташованим під розвантажувальною камерою сушарки. Висушене зерно безперервно

відводиться шлюзовим затвором до норії, яка транспортує його в охолоджувальну колонку. У колонці зерно рухається зверху вниз, під час чого його продувають атмосферним повітрям для охолодження. Потік повітря для охолодження надходить зовні по всій висоті перфорованої частини колонки, проникає через шар зерна до внутрішнього циліндра і виводиться в атмосферу вентилятором.

Рух зерна в охолоджувальній колонці має порційно-періодичний характер. Коли зерно досягає верхнього рівня, тиск на мембрану датчика запускає електродвигун шлюзового затвора для випуску охолодженого зерна. Після зниження рівня до позначки нижнього датчика електродвигун вимикається, і розвантаження припиняється. Рівень зерна поступово підвищується, запускаючи цикл заново.

Основні показники і конструктивні параметри зерносушарки подані в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 Показники барабанної зерносушарки СЗСБ-8

Продуктивність, т/год	8
Витрата умовного палива, кг/год	До 80
Встановлена потужність, кВт	28,2
Зниження вологості, %	До 10 (24-14)
Габаритні розміри, мм: -довжина -ширина -висота	10260 7070 8300
Маса, кг	8300
Тип топки	Прямої дії
Тип пальника	Форсунка механічної дії
Паливо	Суміш тракторного керосину з моторним паливом

Топка зерносушарки виконана у вигляді металевої циліндричної конструкції, що працює на рідкому паливі. Вона включає камеру згоряння, систему подачі палива, вентилятор для розпилення пального, станину, димар і блокувальний механізм.

Сушильним агентом слугує суміш топкових газів і повітря. Камера згоряння виготовлена із міцної сталі. Пальне подається до форсунки за допомогою насоса. У конструкції передбачений перепускний клапан із регулювальним гвинтом. Регулювання витрат пального здійснюється шляхом зміни тиску в системі в межах 10–20 атмосфер та заміною розпилювальних шайб із діаметром отворів 0,8; 1,0; 1,3; 1,7 мм і завихрювачів із каналами перетином 1 і 2 мм². Запалення пального забезпечується постійною подачею іскри від трансформатора високої напруги.

За полум'ям здійснюється контроль за допомогою фотоелемента, який через проміжне реле взаємодіє з магнітним пускачем електродвигуна паливного насоса.

2.3. Побудова та дослідження математичної моделі теплогенератора, як об'єкта управління температурними режимами.

Стабілізація температури сушильного агента здійснюється регулюванням витрати палива, що постачається до повітрянагрівача (теплогенератора), або через контроль швидкості надходження повітря із навколишнього середовища.

Повітрянагрівачі, які працюють на рідкому чи газоподібному паливі й оснащені камерою згоряння, характеризуються складним процесом теплообміну. Цей процес відбувається в динамічних умовах взаємодії рухомого середовища та теплового випромінювання, включаючи зміну фізичних властивостей і хімічного складу середовища, дифузію, горіння тощо. Зважаючи на складність системи рівнянь, що описують всі аспекти теплообміну, для визначення динамічних характеристик таких повітрянагрівачів застосовують спрощені рівняння теплового та матеріального балансів. Аналітичні методи дозволяють усереднювати рушійні

сили взаємодіючих потоків і приймати умову лінійності змін показників процесів вздовж теплообмінного апарата.

Для сільськогосподарських повітрянагрівачів динамічні характеристики визначаються часом зміни температури теплоносія в залежності від варіацій витрат палива або електроенергії (у випадку електрокалориферів).

До категорії прямонагрівачів належать пристрої, де теплоносій утворюється шляхом змішування топкових газів з повітрям. Тепло, отримане внаслідок згоряння розпиленого палива, передається двома способами: частково через випромінювання і конвекцію через стінки камери згоряння, а решта – шляхом прямого змішування топкових газів зі струменем повітря. Теплопередача через стінки камери згоряння визначає інерційну природу об'єкта та його динамічні властивості. Таким чином, для побудови динамічної характеристики основним завданням є розрахунок кількості тепла, переданого через стінку і акумульованого в ній у перехідному режимі.

При стаціонарному режимі, тобто при постійному горінні з незмінним витратами палива, застосовується відповідне рівняння теплового балансу.

$$Q_B + Q_T + Q_{ст} = Q_{тг} + Q_{ст} \quad (2.1)$$

де Q_B та Q_T — кількість тепла, внесена в топку повітрям, що йде на горіння, й паливом, ккал/год;

$Q_{ст}$ — кількість тепла, одержувана при спалюванні палива, ккал/год;

$Q_{ст}$ — кількість тепла, передана через стінки камери згорання, ккал/год;

$Q_{тг}$ — кількість тепла, що міститься в топочних газах, що виходять із камери згорання, ккал/год.

Величини Q_B та Q_T відносно $Q_{ст}$ малі ($\frac{Q_B + Q_T}{Q_{ст}} \cdot 100 < 1\%$), тому ними можна знехтувати та надалі не враховувати.

Тоді температура теплоносія θ_T (регульована величина) на виході з повітрянагрівача може бути подана у вигляді виразу

$$\theta_T = \theta_T' + \theta_T'' - \theta_0 \quad (2.2)$$

та визначена з рівняння теплового балансу

$$Q_H^p \cdot \eta_T \cdot q - L_T \cdot C_T \cdot (\theta - \theta_0) = 0, \quad (2.3)$$

де $\theta_T' = \frac{Q_{ст}}{L_T \cdot C_T} + \theta_0$ — температура теплоносія, отримана за рахунок передачі тепла через стінки. °С; $\theta_T'' = \frac{Q_{ст}}{L_T \cdot C_T} + \theta_0$ — температура теплоносія, одержувана за рахунок тепла, що виділяється в результаті змішування повітря з топочними газами, при нагріванні його від початкового значення. °С; θ_0 — температура зовнішнього повітря, °С; $Q_{н^p}$ — нижча теплотворна спроможність палива, ккал/кг; η_T — коефіцієнт корисної дії повітрянагрівача; q — витрата палива, кг/год, /., теплоносія, кг/год; C_T — питома теплоємність теплоносія, ккал/(кг · °С).

Температура θ_T'' може бути знайдена з рівняння матеріального балансу

$$L_T C_T (\theta_T'' - \theta_T) - L_T C_T (\theta_T - \theta_0) = 0 \quad (2.4)$$

де L_T - кількість топочних газів, кг/год; C_T - середня питома теплоємність газів. ккал/(кг · °С).

Величина θ_T' може бути визначена з виразу (2.2) за умови, що обсяг тепла, яке сприймається внутрішньою поверхнею стінок, буде дорівнювати теплу, відданому повітрю їх зовнішньою поверхнею.

У випадку порушення стаціонарного режиму теплообміну, наприклад, при зміні кількості спалюваного палива, відбудеться зміна температур і теплова рівновага в системі настане лише через певний час.

Щоб виразити зміну температури теплоносія з часом, складемо диференціальне рівняння, що відображає цю залежність. Припускаючи, що температура теплоносія та стінок змінюється по довжині теплообмінної частини лінійно, запишемо кінетичне (2.5), балансове (2.6),

(2.7) і перехідне (2.8) рівняння:

$$\frac{dQ_1}{dt} = \alpha F (\theta_{ст} - \frac{\theta_T' + \theta_0}{2}); \quad (2.5)$$

$$\frac{dQ_1}{dt} = L_T C_T (\theta_T' - \theta_0); \quad (2.6)$$

$$\frac{dQ_2}{dt} = Q_{н^p} \eta_T q - L_T C_T (\theta_T - \theta_0); \quad (2.7)$$

$$\frac{dQ_2}{dt} - \frac{dQ_1}{dt} = G C_{ст} \frac{d\theta_{ст}}{dt}; \quad (2.8)$$

де Q_1 — кількість тепла, передана за час t повітря від стінок, ккал; α — коефіцієнт тепловіддачі від стінок повітря, ккал/(год · м² · °С); F — поверхня тепловіддачі, м²; $\theta_{ст}$ — усереднена температура стінок, °С; Q_2 — кількість тепла, передана стінці

середовищем, що нагріває, за час t , ккал; θ_T — температура толочних газів на виході з камери згорання, °C; G — маса теплообмінних стінок, кг; $C_{ст}$ — питома теплоємність матеріалу стінок, ккал/(кг·°C). Тут і надалі значення $\alpha, \theta_{ст}, G$ та температура середовища, що нагрівається, і нагріваючого середовища у заданому інтервалі приймають середні: $C_T \approx C_0$; $L_T \approx L_0$. Розв'яжемо систему рівнянь, так щоб у формулі (2.8) залишилися тільки постійні (регульований параметр θ_T і час t). Це можна зробити, якщо в рівняннях (2.3) і (2.6) замінити θ_T' через θ_T і θ_T'' та виразити відносно температури стінки

$$\theta_{ст} = \left(\frac{L_T C_T}{\alpha F} + \frac{1}{2} \right) \theta_T - \left(\frac{L_T C_T}{\alpha F} + \frac{1}{2} \right) \theta_T'' + \theta_0 \quad (2.9)$$

диференціюючи рівняння (2.9) за часом, отримаємо

$$\frac{d\theta_{ст}}{dt} = \left(\frac{L_T C_T}{\alpha F} + \frac{1}{2} \right) \frac{d\theta_T}{dt}$$

Підставивши в рівняння (2.8) величини $\frac{dQ_1}{dt}$ та $\frac{dQ_2}{dt}$ з рівнянь (2.6), (2.7) і

значення θ_T і θ_T'' з рівнянь (2.2) і (2.4), після ряду перетворень одержимо диференціальне рівняння перехідного режиму

$$\frac{GC_T \left(\frac{L_T C_T}{\alpha F} + \frac{1}{2} \right)}{L_T C_T} \cdot \frac{d\theta_T(t)}{dt} + \theta_T(t) = \frac{Q_H^p \eta_T q}{L_T C_T} + \theta_0$$

$$\frac{GC_T \left(\frac{L_T C_T}{\alpha F} + \frac{1}{2} \right)}{L_T C_T} \cdot \frac{d\theta_T(t)}{dt} + \theta_T(t) = \frac{Q_H^p \eta_T q}{L_T C_T} + \theta_0 \quad (2.10)$$

Рівняння (2.10) з врахуванням запізнення в об'єкті при нульових початкових умовах може бути записано в загальному вигляді як рівняння аперіодичної ланки першого порядку з запізненням:

$$T_0 \frac{d\theta_T(t)}{dt} + \theta_T(t) = k_0 q(t - \tau) T_0 \frac{d\theta_T(t)}{dt} + \theta_T(t) = k_0 q(t - \tau) \quad (2.11)$$

Де
$$T_0 = \frac{GC_{ст} \left(\frac{L_T C_T}{\alpha F} + \frac{1}{2} \right)}{L_T C_T} \quad (2.12)$$

$$k_0 = \frac{Q_H^p \eta_T}{L_T C_T} \quad (2.13)$$

T_0 — постійна часу, с; k_0 — коефіцієнт передачі об'єкта, °С·год/кг; τ — запізнення в об'єкті, яке можна визначити з виразу:

$$\tau = \tau_r + \tau_{тр} \quad (2.14)$$

де τ_r — час горіння в топці ($\tau_r < 1$ с); $\tau_{тр} = \frac{l}{\omega_m}$ — транспортне запізнення, с; l — відстань від місця встановлення вимірювального пристрою температури теплоносія до факела, м; ω_m — швидкість теплоносія у повітропроводі, м/с.

Для повітрянагрівачів прямого нагрівання значення τ мале й складає біля 2-3с. Передаточна та перехідна функції для повітрянагрівачів прямого нагрівання будуть мати вигляд:

$$W(s) = \frac{k_0}{T_0 \cdot s + 1} \cdot e^{-s\tau} \quad (2.15)$$

$$\theta_r = k_0 q (1 - e^{-\frac{t-\tau}{T_0}}) \quad (2.16)$$

У рівнянні (2.10) коефіцієнт тепловіддачі α є величиною змінної й залежить від температурного режиму. Отже, й постійна часу T_0 буде коливатися в деяких межах відповідно до зміни α .

Величина коефіцієнта передачі об'єкта може бути прийнята постійної незалежно від режиму, тому що для повітрянагрівачів із прямим нагрівом значення η_r змінюється незначно. Його коливання залежать в основному від температури навколишнього середовища. Тому надалі необхідно визначати межі зміни α та T_0 в залежності від витрати палива.

2.4. Експериментальне визначення передаточної функції.

Передаточну функцію теплогенератора ТГ-2.5 можна визначити на основі емпіричного рівняння, отриманого в результаті експериментального дослідження повітрянагрівача зерносушарки ЗСБС-8. Зважаючи на те, що дана модель не

враховує розподілу температури вздовж тракту руху теплоносія, пропонується використати спрощену модель із розподіленими параметрами.

У розробці моделі, що характеризує динамічні властивості ТГ як об'єкта автоматизації, зроблено кілька основних припущень:

1) Конструкцію ТГ представлено у вигляді трьох динамічних ємностей: корпус теплогенератора, стінка зовнішньої труби (жарової труби) та повітря, яке підлягає нагріванню.

2) Виділення тепла відбувається рівномірно по всій довжині (L) і об'єму ТГ. Температура стінки вважається постійною в кожному поперечному перерізі. У кільцевому просторі між корпусом ТГ і стінкою переміщується повітря з масовою витратою G.

Математична модель будується на основі системи диференціальних рівнянь, які описують динаміку теплових процесів. Формування цих рівнянь базується на застосуванні принципу збереження енергії у вигляді теплового балансу для трьох зазначених елементів моделі.

$$g_T = \frac{\alpha_i f_T}{L} \cdot (\Theta_T - t); \quad (2.17)$$

$$\frac{\alpha_i f_i}{L} \cdot (\Theta_T - t) = cm \cdot \frac{dt}{d\tau} + c \cdot G \cdot L \frac{dt}{dx} + \alpha_i \cdot f_i (t - \Theta_c) \quad (2.18)$$

$$\alpha_i \cdot f_c (t - \Theta) = m_c c_c \frac{d\Theta_c}{d\tau} + \alpha_z f_z \cdot (\Theta_c - t_z) \quad (2.19)$$

де $t, \Theta_T, \Theta_c, t_z$ - температура повітря, ТГ, стінки і зовнішнього середовища, °С, відповідно;

$\alpha_T, \alpha_c, \alpha_z$ - коефіцієнт тепловіддачі до повітря від ТГ, стінки внутрішньої та зовнішньої, Вт/град м

f_i, f_c - питома поверхня ТГ і стінки; м²/м.

C, C_c - питома теплоємність повітря і стінки; Дж/кг град.

G - витрати повітря; кг/с.

M, M_c - маса повітря в кільцевому просторі і стінки, кг.

Розв'язок системи (1) - (3) для сталого режиму за умов:

$$t_{1x=0} = t_1 \quad ; \frac{dt}{d\tau} = 0; \quad \frac{d\Theta}{d\tau} = 0.$$

Має вигляд:

$$t = \Theta_n = \Theta = \frac{b}{a} - \left(\frac{b}{a} - t_1\right) \cdot e^{-\frac{\alpha}{T_1} \cdot X} \quad (2.20)$$

де $\alpha = \frac{\alpha_z}{\alpha \cdot \alpha_z}; \quad b = \frac{g}{\alpha_T \cdot f_T} + \frac{\alpha_z}{\alpha_T + \alpha_z}; \quad T = \frac{G \cdot L \cdot C}{\alpha \cdot f};$

Для перехідного режиму:

$$t = \Theta - (\Theta - t_0) \cdot e^{-\frac{\alpha}{T_1} \cdot \tau}$$

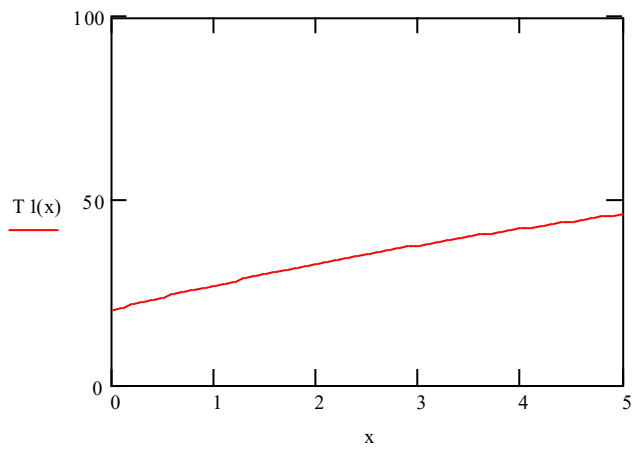
де $\alpha = \frac{\alpha_z \cdot \alpha \cdot f}{\alpha_z + \alpha}; \quad T_1 = cm + a_n \cdot c_e \cdot G_e.$

Вводимо вихідні дані:

$\alpha_1 := 8.3$	$t_1 := 20$	$g := 3345 \cdot 10^2$	$L := 5$
$\alpha_2 := 23.7$	$t_0 := 20$	$G := 8.3$	$K := 0.36$
$f := 900$	$t_z := 15$	$C_p := 1.05 \cdot 10^3$	
$b_1 := 0.775$	$b_2 := 0.625$	$b_3 := 0.35$	$x := 0, 0.1..5$
$a := \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2}$	$T := \frac{G \cdot C_p \cdot L}{\alpha_1 \cdot f}$	$\lambda := \frac{\alpha_1 \cdot \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} \cdot f$	
$a = 0.741$	$T = 5.833$	$\lambda = 5.532 \times 10^3$	
$T1(x) := g \cdot \frac{(\alpha_1 + \alpha_2)}{(\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot f)} \cdot \left(1 - e^{-\frac{-a}{T} \cdot x}\right) + t_1 \cdot e^{-\frac{-a}{T} \cdot x} + \left(\frac{\alpha_2}{\alpha_1} \cdot K - e^{-\frac{-a}{T} \cdot x}\right) \cdot t_z$			

T1(x) =

20.419
21.119
21.81
22.492
23.166
23.831
24.487
25.136
25.776
26.408
27.032
27.648
28.257
28.858
29.451

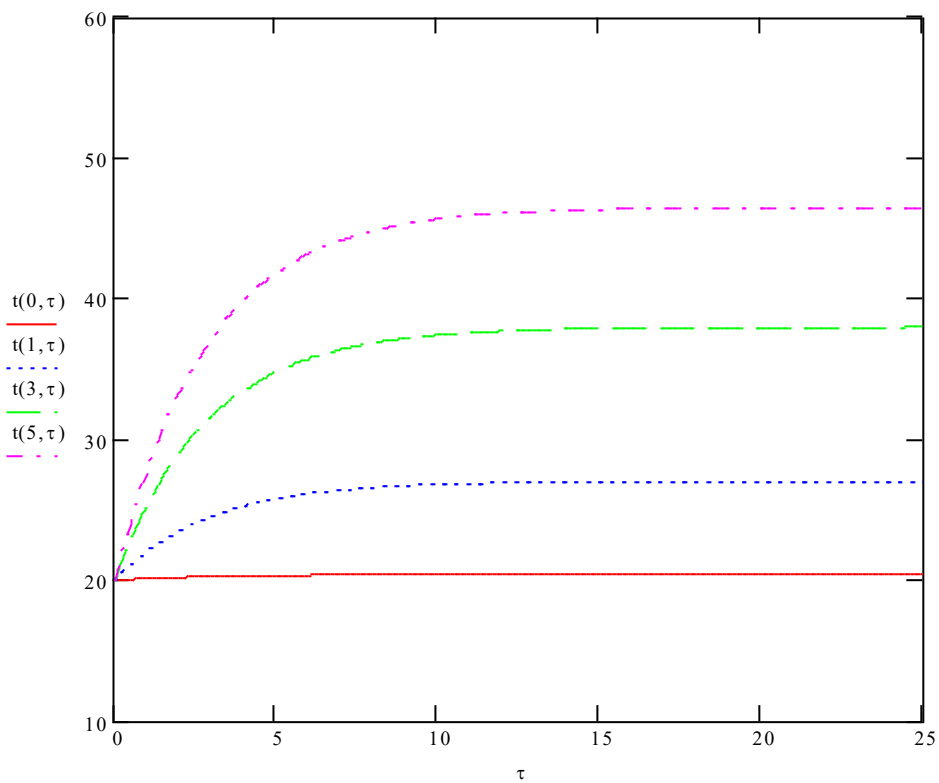


$\tau := 0, 0.1..25$

$$t(x, \tau) := T1(x) - (T1(x) - t0) \cdot e^{-b1 \cdot \tau}$$

$$t(x, \tau) := T1(x) - (T1(x) - t0) \cdot e^{-b2 \cdot \tau}$$

$$t(x, \tau) := T1(x) - (T1(x) - t0) \cdot e^{-b3 \cdot \tau}$$



2.5. Вибір алгоритму управління та параметри настройки регулятора.

Мікропроцесорні системи управління мають ряд значних переваг у порівнянні зі звичайними локальними автоматичними системами. Їх гнучкість в оперативній перебудові, висока швидкодія, значна обчислювальна потужність, а також стійкість до відмов і живучість створюють передумови для того, щоб такі цифрові системи стали провідними в найближчому майбутньому, як прогнозують експерти.

Однак використання цифрових систем управління вимагає вирішення низки складних завдань, ключовим серед яких є визначення сигналів управління, що відповідали б заданим критеріям якості роботи системи. Удосконалення методів вибору параметрів налаштування мікропроцесорних регуляторів залишається актуальним напрямком розвитку.

Пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор (ПІД-регулятор) впливає на регульовальний орган об'єкта управління через пропорційну (Кп), інтегральну (Кі) та диференціальну (Кд) складові. Для технологічних умов, що вимагають мінімальної статичної похибки та скороченого часу регулювання, застосовується саме ПІД-закон керування. Вибір параметрів налаштування регулятора і проведення аналізу необхідно виконувати з використанням теорії цифрових систем.

На початковому етапі визначається період квантування T .

Скориставшись програмою «ТАУ», було встановлено частоту, яка становить 8,9/годину.

На основі цього розраховуємо період квантування: $T = \pi / 8,9 = 3,5$ секунд.

Наступним кроком є формування передатної функції неперервної частини системи. У конкретному випадку ця функція має визначений вигляд.

$$W_{нч}(p) = \frac{1.33}{(1.7p + 1)(0.1p + 1)}$$

Або

$$W_{нч}(p) = \frac{1.33}{0,17p^2 + 1.8p + 1}$$

Оскільки ми прийняли цифровий ПД-регулятор, то для того щоб отримати більш точні розрахунки, Z- перетворення. Спочатку розкладемо $W_{нч}(p)$. Для цього:

$$\frac{A}{1.7p + 1} + \frac{B}{0.1p + 1} = \frac{0.1pA + A + 1.7pB + B}{(1.7p + 1)(0.1p + 1)}$$

Отже

$$A+B=1.33, \text{ звідси } A=1.33-B$$

$$0.1A+1.7B=0$$

Підставимо відповідне значення A і отримаємо

$$0.1(1.33-B)+1.7B=0$$

$$0.133-1.6B+1.7B=0$$

$$0.133+1.6B=0$$

Отже

$$B=0.083$$

$$A=1.33-0.083=1,247$$

Замість A і B підставимо відповідні значення і отримаємо

$$\frac{1.247}{1.7p+1} + \frac{0.083}{0.1p+1}$$

Далі необхідно знайти кожне Z- перетворення і підсумувати, щоб отримати $W_{нч}(z)$.

Скористаємося програмою MATLAB

$$W=tf([1.247],[1.71])$$

$$C2d=(w,0.028)$$

$$\text{Отримаємо } W_{нч}(z1) = \frac{0.02037}{z-0.9837}$$

$$W=tf([0.083],[0.11])$$

$$C2d=(w,0.028)$$

$$\text{Отримаємо } W_{нч}(z2) = \frac{0.02027}{z-0.7558}$$

Підсумувавши $W_{нч}(z1)$ і $W_{нч}(z2)$, тобто $\frac{0.02037}{z-0.9837} + \frac{0.02027}{z-0.7558}$ отримаємо

$$W_{нч}(z) = \frac{0.041z - 0.035}{z^2 + 1.8z + 0.743}$$

$$\lim W_{нч}(z)=0.054412$$

$$\text{Нехай } W_{нч}(p) = \frac{1.33}{0.17p^2+1.8p+1}, \text{ звідси } K=1.33, \alpha1=1.8, \beta=0.$$

Добротність системи за швидкістю визначається коефіцієнтом добротності $Kv=1/C1$, де $C1$ - коефіцієнт помилки системи який дорівнює

$$C1 = \frac{(\alpha1 - \beta1)K}{(1 + K)^2}$$

Отже, в нашому випадку

$$C1 = \frac{(1.8 - 0)1.33}{(1 + 1.33)^2}$$

$$\text{Звідси } C1=0.441, \text{ отже } Kv=\frac{1}{0.441}=2.268$$

$$\text{Відповідно } Ki=\frac{Kv}{31.5} = 0.072$$

Розв'яжемо систему рівнянь та визначимо Kp і Kd

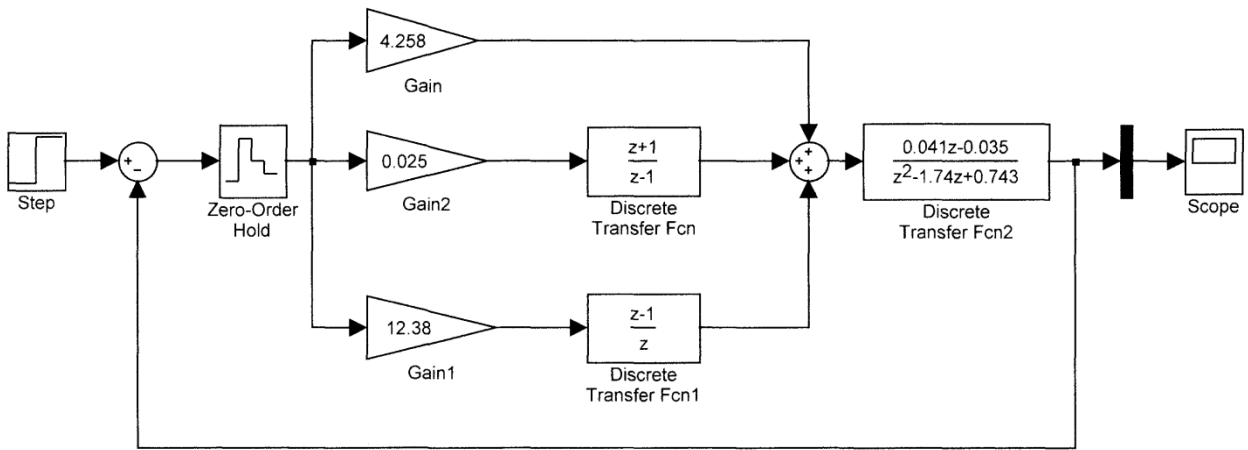


Рис. 2.2. Структурно алгоритмічна схема САР.

Перехідний процес системи (з ПД- регулятором і без нього) будемо за допомогою програми MATLAB.

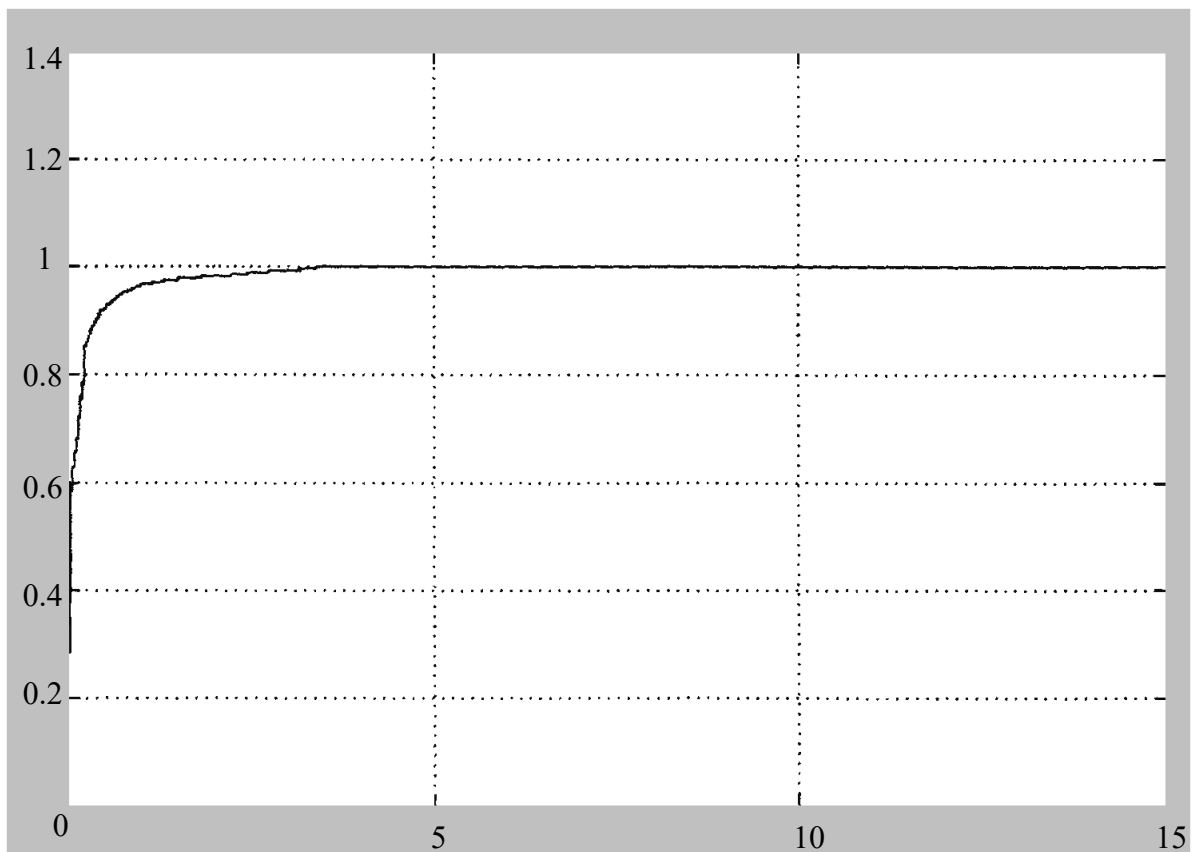


Рис. 2.3. Графік перехідного процесу автоматичної системи.

З графіка видно, що час регулювання системи складає 3,5 секунди, перегулювання відсутнє, а коливальність системи також дорівнює нулю. Аналогічним чином виконуємо перевірку ще двох систем.

Для дослідження показників якості роботи системи використавши MATLAB (як у попередньому випадку) отримаємо перехідний процес, зображений на рисунку 2.4.

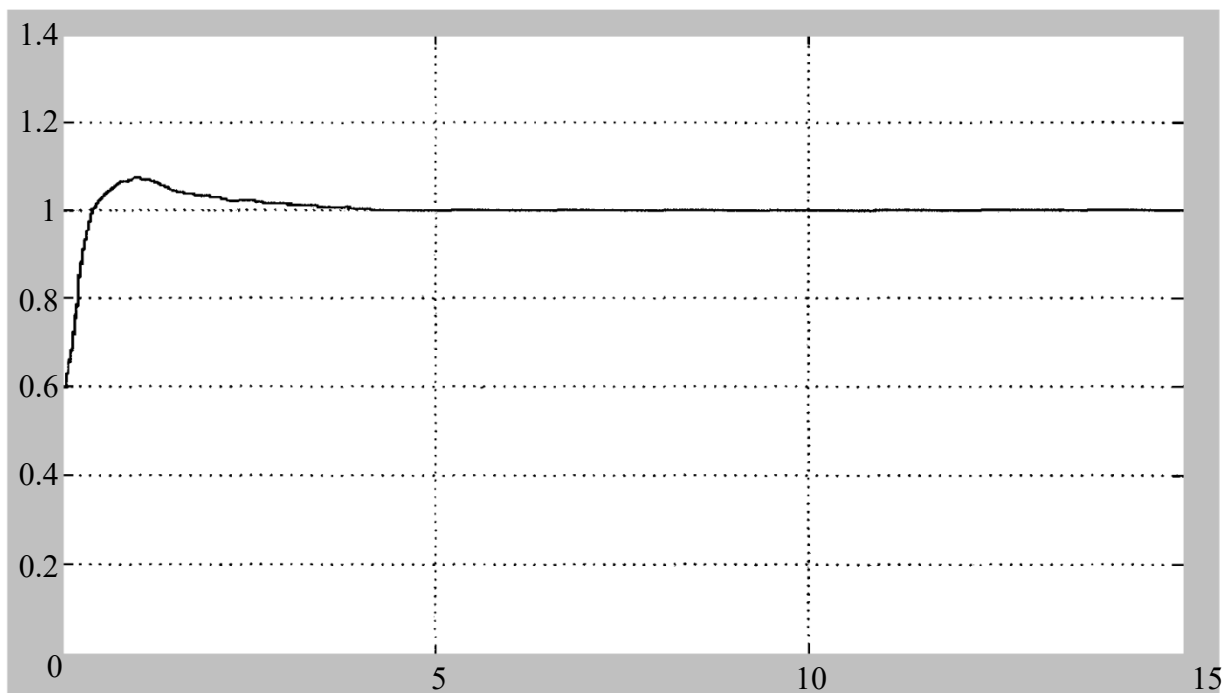


Рис. 2.4. Графік перехідного процесу автоматичної системи.

З графіка можна спостерігати, що час регулювання системи складає 4 секунди, час перерегулювання відсутній, а рівень коливальності системи також дорівнює нулю. Для аналізу характеристик якості роботи системи за допомогою MATLAB, як і раніше, отримано перехідний процес:

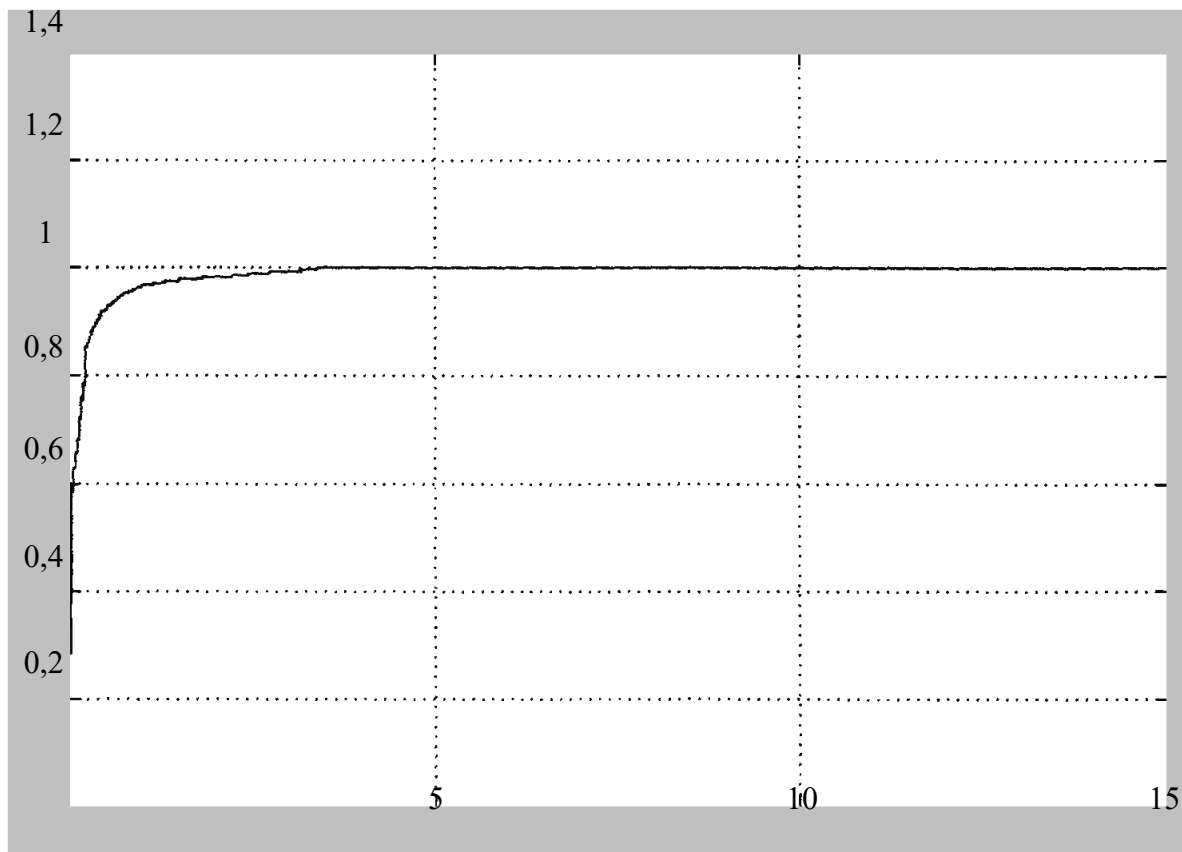


Рис. 2.5. Графік перехідного процесу автоматичної системи.

З графіка видно, що час налаштування системи становить 4,7 секунди, час перевищення — нульовий, а коливання в системі також відсутні. Проаналізувавши попередні три випадки, можна дійти висновку, що найоптимальнішим перехідним процесом є той, що зображений на рис. 2.7, де час налаштування системи складає дві години.

Отже, датчик температури варто розміщувати безпосередньо біля повітропроводу. У місцях, віддалених від повітропроводу ($x = 3$ м, $x = 5$ м), слід встановлювати контрольні датчики з підключенням до центрального пульта.

2.6. Дослідження САР температури на стійкість.

Стійкість цифрової системи регулювання визначаємо за критерієм Джурі, що передбачає стійкість системи, якщо всі корені характеристичного рівняння замкнутої системи розташовані всередині одиничного кола з центром у точці $[0;0]$ на Z -площині. Передаточна функція цифрової розімкненої системи записується у вигляді:

$$W_{ppo}(z) = W_{нн}(z) \cdot Kp + \frac{Ki \cdot T(z+1)}{2 \cdot (z-1)} + \frac{Kd(z-1)}{T \cdot z}$$

Підставивши числові значення отримаємо

$$W_{ppo}(z) = \frac{0.041z - 0.035}{z^2 - 1.74z + 0.743} \left(4.258 + \frac{0.072 \cdot 0.028(z+1)}{2 \cdot (z-1)} + \frac{0.3466(z-1)}{0.028 \cdot z} \right)$$

Після підрахунків отримали

$$W_{ppo}(z) = \frac{0.18z^3 + 0.22z^2 - 0.07z + 0.03}{z^4 - 2.77z^3 + 2.54z^2 - 0.77z}$$

Знайдемо передаточну функцію замкненої системи

$$W_{зам}(z) = \frac{W_{ppo}(z)}{1 + W_{ppo}(z)} = \frac{0.18z^3 + 0.22z^2 - 0.07z + 0.03}{z^4 - 2.95z^3 + 2.76z^2 - 0.84z - 0.03}$$

Розв'яжемо характеристичне рівняння замкненої системи за допомогою ППП

MathCAD.

$$z^4 - 2.95 \cdot z^3 + 2.76 \cdot z^2 - 0.84 \cdot z - 0.03 \text{ solve } ,z \rightarrow \begin{bmatrix} -(3.219100035665197305710^{-2}) \\ .75495377091125615427 \ .2510629753701853531i \\ .75495377091125615427 \ .2510629753701853531i \\ 1.4722834585341396645 \end{bmatrix}$$

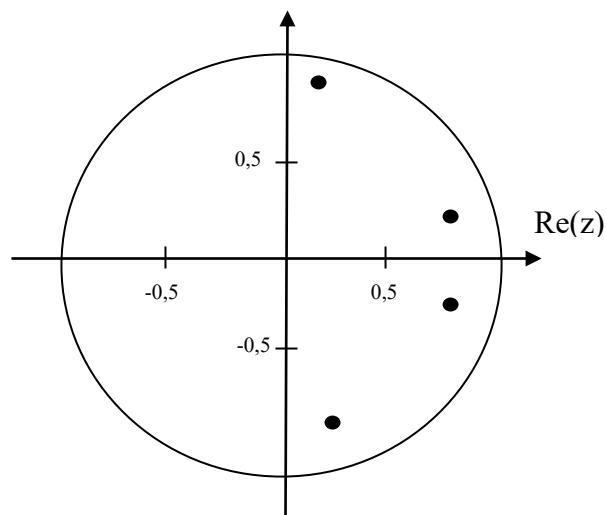


Рис. 2.6. Дослідження САР на стійкість за критерієм Джурі.

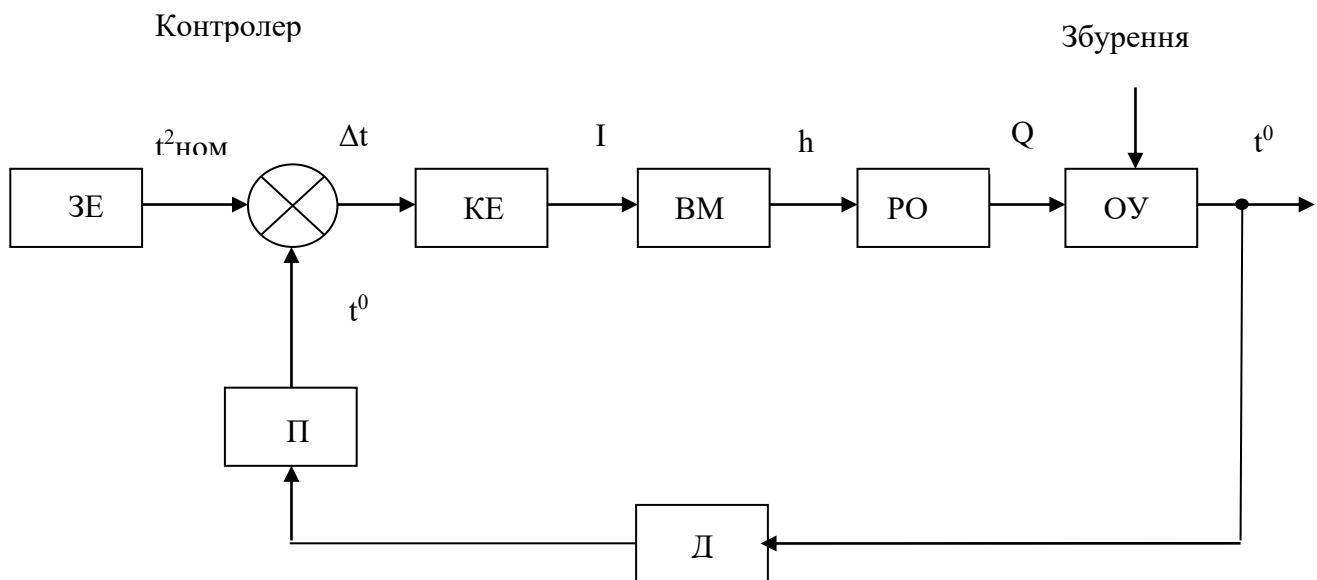


Рис. 2.7. Функціональна схема САУ.

ЗЕ - задаючий елемент;

ПЕ - порівняльний елемент;

КЕ - керуючий елемент (ICP CON I - 7060);

П - перетворювач - комп'ютер з програмою;

Контроллери ICP CON I-7017 (П) та ICP CON I - 7060 (КЕ);

ВМ - виконавчий механізм;

РО - регулюючий орган (електромагнітний клапан);

ОУ - об'єкт управління;

Д - датчик температури;

$t^{\circ}_{ном}$ - номінальна температура повітря;

Δt - висновок про зміну t° ;

I - струм;

h - переміщення клапана;

Q_0 - кількість палива, що подається;

t°_r - поточна температура повітря.

3. ВИБІР КОМПЛЕКСУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

3.1. Обґрунтування та вибір вимірювальних датчиків температури.

Датчик слід обирати таким чином, щоб його діапазон вимірювань покривав коливання контрольованої величини X і максимально наближався до цих меж, враховуючи при цьому необхідність забезпечення достатнього запасу перевантажувальної здатності. Також важливо передбачити можливість підключення датчика до обраного електронного пристрою управління регулятором. Особливу увагу варто звернути на швидкодію вимірювального перетворювача, яка характеризується його постійною часу $T_{вп}$.

Сприймаючий елемент необхідно обирати з урахуванням меж вимірювання температури так, щоб під час стабілізації температури повітря θ на заданому рівні θ_0 , він не спричиняв динамічних похибок у вимірюванні температури. Постійна часу цього елемента $T_{се}$ має бути щонайменше на порядок меншою від постійної часу об'єкта управління $T_{оу}$. Для реалізації цих умов добре підходить датчик ТСМ 012-014 (рис. 3.1).

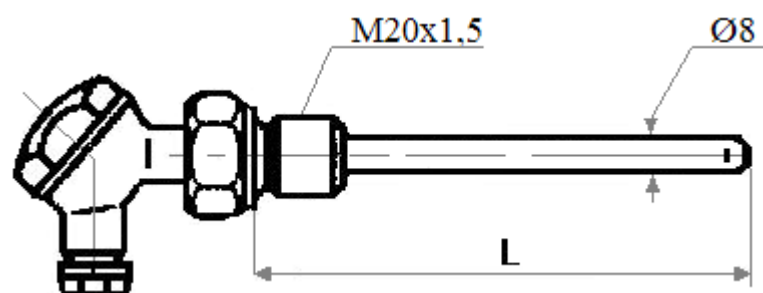


Рис. 3.1. Термоперетворювач опору марки ТСМ 012-014

Технічні характеристики:

- робочий діапазон температур: $-50...+ 300^{\circ}\text{C}$ клас А;
- номінальна статична характеристика: 100М;
- показник теплової інерції: не більше 20с;
- умовний тиск робочого середовища, $P_{у}$: 6,3 МПа;
- матеріал захисної арматури: сталь 12Х18Н10Т;

- схема підключень: трьох- або чотирьох провідна;
- захищеність від впливу пилу та води: IP55;
- стійкість до впливу вібрації: N3.

Передаточна функція має вигляд:

$$W_{ce}(s) = \frac{k_{ce}}{T_{ce} \cdot s + 1} \quad (3.1)$$

Де k_{ce} визначається за формулою:

$$k_{ce} = \alpha \cdot R_0 \quad (3.2)$$

де α — температурний коефіцієнт опору, що дорівнює 0,004 1/°C,

R_0 — значення опору при $t = 0^\circ\text{C}$, 100 Ом.

Підставивши дані в передаточну функцію, вона матиме вигляд:

$$W_{ce}(s) = \frac{0,4}{20 \cdot s + 1} \quad (3.3)$$

3.2. Обґрунтування вибору виконавчого механізму з електромагнітним клапаном.

Виконавчі механізми безпосередньо з'єднуються з регулювальними органами та пересувають їх у відповідності до сигналу, що надходить від пристрою, який задає алгоритм керування. Залежно від типу споживаної енергії, ці механізми діляться на електричні, пневматичні та гідравлічні. У сільському господарстві найбільшого поширення набули електричні виконавчі механізми, які додатково поділяються на електромагнітні (соленоїдні приводи) та електродвигунні. Під час їх вибору важливо враховувати переставне зусилля або момент, який вони здатні створювати.

Переставне зусилля, необхідне для зсуву регулювального клапана, складається з декількох компонентів: сили, що виникає через статичний тиск середовища на затвор; сили, що впливає на шток від середовища; а також сили тертя штока об сальникову набивку.

Основна роль виконавчого механізму в системі автоматичного керування полягає в тому, щоб рухати регулювальний орган так, аби зміни в алгоритмі керування були мінімальними. Це багато в чому залежить від типу з'єднання між виконавчим механізмом і регулювальним органом. Виділяють три основні способи з'єднання: безпосереднє, жорстке та тросове.

Безпосереднє з'єднання є найпростішим. При цьому переміщення та швидкість руху регулювального органу та виконавчого механізму збігаються. Такий спосіб часто застосовується для електромагнітних та багатообертових виконавчих механізмів, які використовуються для приводу запірної трубопровідної арматури.

Практичне застосування знаходять електромагнітні виконавчі механізми з поступальним рухом, які керують клапанами, вентилями, заслінками й золотниками. Регулювальні органи, такі як клапани та вентилі, коли конструктивно сумісні з електромагнітними механізмами, називаються електромагнітними (соленоїдними).

Електромагнітні виконавчі механізми використовуються для дистанційного управління механічними, гідравлічними або пневматичними пристроями. Окрім цього, вони застосовуються в дискретних або позиційних регуляторах автоматичних систем.

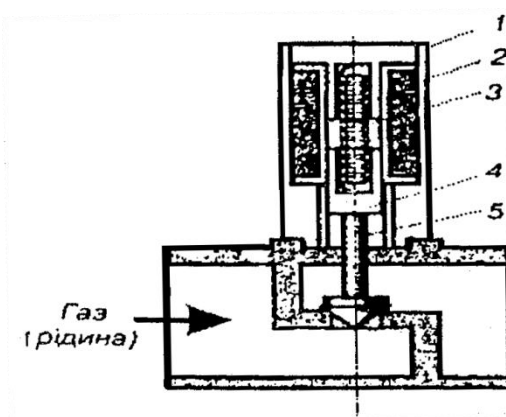


Рис. 3.2. Принципова елетрокінематична схема виконавчого механізму з електромагнітним клапаном

У якості силових елементів у таких виконавчих механізмах (ВМ) застосовують електромагніти (див. Рис. 3.2). Одним із суттєвих недоліків цих механізмів є ризик виникнення гідравлічних ударів у трубопроводах під час їх спрацювання. До того ж, вони не оснащені пристроями для ручного управління клапанами та вентилями у разі відсутності електроенергії або виходу з ладу електромагнітів.

Електромагнітні ВМ відрізняються меншою вартістю і простотою конструкції порівняно з електродвигуновими. Вони легші в управлінні, більш надійні у використанні, мають високу швидкодію і можуть працювати як на змінному, так і на постійному струмі. Для роботи на змінному струмі найчастіше застосовують соленоїдні моделі постійного струму, обладнані вбудованими випрямлячами в колі живлення.

Електромагнітні ВМ, які призначені для короткочасного режиму роботи, зазвичай містять два електромагніти: головний (тяговий) та привід зачіпки. Головний відповідає за переміщення регулюючого органу (РО), тоді як зачіпка утримує РО у встановленому положенні після спрацювання. При подачі напруги на тяговий електромагніт, він активується, і його якір переміщає регулюючий орган у першу позицію, де він фіксується зачіпкою. Це дозволяє за допомогою кінцевого вимикача роз'єднати коло живлення обмотки тягового електромагніту. Для повернення РО у вихідне положення потрібно подати напругу на обмотку електромагніту зачіпки. Після її активації зачіпка звільняє РО, і той під дією власної ваги або пружини повертається у другу позицію. Зняття напруги з електромагніту зачіпки також здійснюється кінцевим вимикачем.

Методика вибору відповідного ВМ з електромагнітним клапаном базується на певній послідовності розрахунків. Переставне зусилля, необхідне для переміщення регулювального клапана, складається із суми сил: незрівноваженості статичного тиску середовища на затвор, тиску середовища на шток і тертя штока об сальникову набивку. Силу статичної незрівноваженості затвора визначають за відповідною формулою:

$$F_3 = \Delta p_{\max} \cdot \Delta S_c \quad (3.4)$$

де F_3 — сила статичної незрівноваженості;

Δp_{\max} — максимальний перепад тиску, кгс/см²;

ΔS_c — різниця в площах верхнього та нижнього сідел, см².

Враховуючи що $\Delta p_{\max} = 3$ кгс/см² і $\Delta S_c = 0,7$ см² (визначаємо з таблиці 3.1), обраховуємо формулу (3.4):

$$F_3 = 3 \cdot 0,7 = 2,1 \text{ кгс.}$$

Таблиця 3.1. Технічна характеристика регулюючих клапанів

D_y , мм	ΔS_c , см ²	$d_{шт}$, мм
15;20;25	0,7	8
32;40;50	1,2	10
65;80	2	12
100;125;150	5	14
200;250;300	20	16

Сила тиску середовища на шток:

$$F_{шт} = 0,785 \cdot d_{шт}^2 \cdot P_{кл} \text{ кгс,} \quad (3.5)$$

де $d_{шт}$ - діаметр штока, мм;

$P_{кл}$ - максимальний тиск за клапаном, кгс/см².

$$F_{шт} = 0,785 \cdot 0,64 \cdot 2 = 1,008 \text{ кгс,}$$

Силу тертя штока визначити важко, тому переставне зусилля виконавчого механізму знаходять за виразом:

$$F_{в.м.} = 2 \cdot (F_3 + F_{шт}) \text{ кгс,}$$

$$F_{в.м.} = 2 \cdot (2,1 + 1) = 6,2 \text{ кгс.}$$

Враховуючи розрахункові дані вибираємо електромагнітний ВМ такого типу із такими параметрами:

Таблиця 3.2. Технічні характеристики МЕР-100

Тип	Номінальна сила тиску середовища на шток, кгс	Час повного ходу шток, с	Повний хід штока, мм	Споживана потужність, ВА	Маса, кг
МЕР-100	1,0	16;40;100;250	25;100	31;64	10

3.3. Вибір алгоритму управління та технічних засобів для його реалізації.

Алгоритм роботи. У цій САР пропонується використовувати для загального управління комп'ютер (промисловий або персональний) і РС-сумісні контролери ІСРСОН І-7000. Послідовність роботи САР визначена так:

1. Вимірюється температура сушильного агента.
2. Отримане значення температури, яке перетворюється в напругу, передається до комп'ютера за допомогою контролера ІСРСОН І-7017.
3. Програма аналізує отримане значення температури.
4. Якщо температура знаходиться в межах норми або перевищує її, подається команда на ІСРСОН І-7060, яка вимикає напругу живлення виконавчого механізму з електромагнітним клапаном, що перекриває подачу палива з теплогенератора.
5. Якщо температура нижча за номінальну і її потрібно підвищити, подається команда на ІСРСОН І-7060 для увімкнення напруги живлення виконавчого механізму з електромагнітним клапаном, що відкриває подачу палива з теплогенератора.

Контролери. Останнім часом PC-сумісні контролери дедалі більше завойовують позиції у сфері промислової автоматизації. Серед їхніх переваг можна виділити високу надійність, знижену собівартість, відкриту архітектуру, а також простоту програмування, проектування, впровадження і обслуговування. До популярності таких контролерів також сприяє доступність широкого кола спеціалістів, обізнаних із PC-технологіями.

Контролери та модулі серії I-7000 входять до категорії доступних PC-сумісних пристроїв, які пропонують ефективні рішення для різноманітних завдань промислової автоматизації. Лінійка I-7000 включає широкий асортимент продукції: контролери, комунікаційні модулі, модулі аналогового введення-виведення, таймери/лічильники. Передача даних здійснюється через інтерфейс RS-485 зі швидкістю від 1200 до 115 200 бод. Кількість сумісних модулів в одному сегменті системи може сягати 256, а з використанням повторювачів (наприклад, модуль I-7510) – до 2048. Максимальна довжина сегменту без повторювачів становить 1,2 км, а при зниженні швидкості передачі до рівня менше 2400 бод – до 3,6 км. Зручність полягає в тому, що обмін із модулями здійснюється за відкритим протоколом, а програмування залишається простим і зрозумілим.

Кожен модуль є самодостатнім функціональним пристроєм, оформленим у корпусі з міцної негорючої пластмаси. На корпусі передбачені роз'єми і клемні з'єднувачі для надійного з'єднання зовнішніх входних і вихідних контурів. Установлення модулів не потребує використання спеціальних монтажних плат і можливе як на стандартній несучій DIN-рейці, так і безпосередньо на панельній стінці.

Для конвертації аналогового сигналу в цифровий і, відповідно, передачі інформації про температуру ґрунту до комп'ютера в автоматизованій системі регулювання температури пропонується застосування контролера ICP CON I-7017. Цей пристрій має вісім каналів для прийому аналогових сигналів від восьми датчиків, таким чином один контролер дозволяє вимірювати температуру в восьми різних точках теплиці. Тип входу сигналу можна обрати: mV, V або mA. Для сигналу у вигляді напруги в мілівольтах доступні діапазони ± 150 mV або ± 500

mV, для напруги у вольтах – ± 1 V, ± 5 V і ± 10 V. Для струму в міліамперах можна вибрати діапазон ± 20 mA із використанням зовнішнього резистора. Роботу з такими сигналами забезпечує температурний датчик опору, що змінює значення свого опору залежно від температури середовища.

Як видно, модуль ICP CON I-7017 приймає вхідний сигнал у вигляді напруги або струму. Тому, для переходу від зміни опору до зміни напруги використовується мостова схема підключення (рис. 3.3). Для конвертації даних у цифрові сигнали можна застосовувати цифрові вхідні модулі ICP CON I-7060 або контролер-лічильник ICP CON I-7080. Цей контролер дозволяє програмувати тип даних, що надходять на його вхід. Максимальне значення, яке можна подати на вхід ICP CON I-7080 - $232=4294967895$.

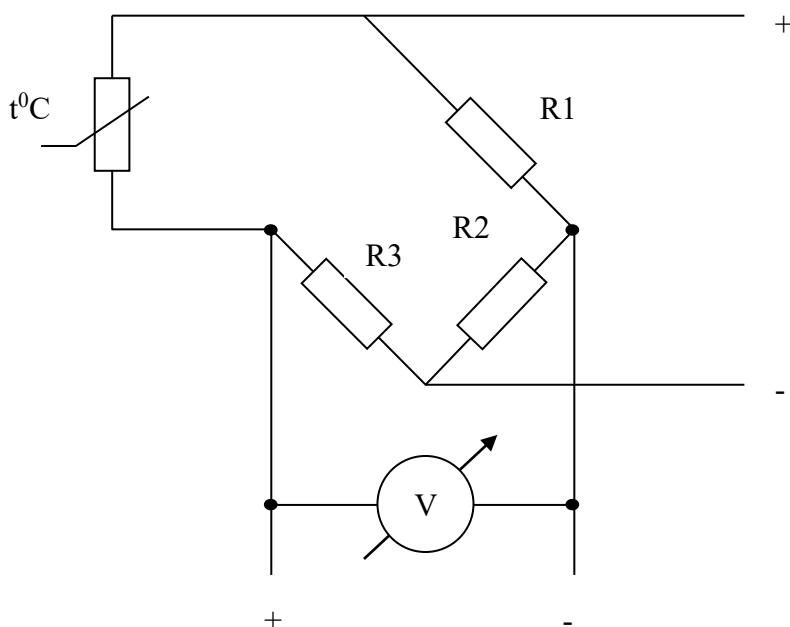


Рис. 3.3 Мостова схема підключення.

Для забезпечення подачі напруги на електромагніт використовуємо контролер ICP CON I-7060. Це пристрій релейного типу, оснащений чотирма видами релейних контактів. Перша група контактів знаходиться в нормальному стані розімкненими. Програма, встановлена на персональному комп'ютері, може передати команду на ICP CON I-7060 для замикання контакту будь-якого реле. Час, необхідний для перемикання контактів, становить 10 мс.



- Вхід - 4 канали дискретного введення
- Вихід - Релейний вихід, 4 канали дискретного виведення
- Загальний час переключення - 10 мс
- Діапазон вихідного сигналу – 0 ÷ 30 В
- Напруга ізоляції - 5000В
- Споживча потужність - 1,9 Вт

Рис. 3.5. Модуль цифрового виведення I-7060D.

Таблиця 3.3. Технічні дані модуля ICP CON I-7060D

Вхід	4 канали дискретного введення
Вихід	Релейний вихід, 4 канали дискретного виведення
Час включення реле	3 мс
Час виключення реле	1 мс
Загальний час переключення	10 мс
Діапазон вихідного сигналу	0-30 В
Напруга ізоляції	5000 В постійного струму
Споживча потужність	1,9 Вт

3.4. Обґрунтування та вибір електротехнічного обладнання

Для забезпечення функціонування системи автоматизації необхідне її електроживлення. Під час розробки схеми електроживлення пристроїв і засобів автоматизації слід враховувати вимоги до безперебійності роботи, розташування джерел живлення щодо споживачів, а також зручність і безпеку експлуатації.

У щитах і розподільчих блоках система живлення містить апаратуру для захисту та керування живильною і розподільчою мережею. Вибір цих компонентів та їх розміщення повинні забезпечувати високу надійність, комфорт у користуванні та максимальну безпеку.

Проектування живильної мережі включає визначення оптимальної напруги, підбір та розміщення проводів, а також вибір пристроїв для захисту та керування. Напруга живильної мережі обирається з урахуванням вимог приладів і засобів автоматизації, що використовуються, та напруги, прийнятої в системі енергопостачання об'єкта.

Кількість фаз та тип проводів у живильній мережі визначається виходячи з потреб пристроїв і засобів автоматизації, а також допустимого струму для обраного кабелю.

Вибір характеристик апаратів захисту та керування здійснюється з урахуванням вимог ПУЕ. Номінальна напруга $U_{н.а.}$ апаратів захисту та керування повинна бути більша або дорівнювати номінальній напрузі мережі $U_{н.м.}$, а номінальний струм $I_{н.а.}$ рубильника, пакетного вимикача, тумблера, автоматичного вимикача та плавкої вставки більше або дорівнювати номінальному струму кола $I_{н.к.}$. При виборі безінерційних запобіжників необхідно враховувати, що плавка вставка не повинна перегорати при короткочасному збільшенні струму кола, наприклад, при запуску двигунів виконавчих механізмів.

3.5. Розрахунок і вибір пуско-захисної апаратури.

У теплогенераторі застосовується двигун, який служить приводом вентилятора для забезпечення подачі нагрітого повітря в шахту зерносушарки. У моделі зерносушарки СЗБС-8 встановлений двигун марки АІР100S4 з наступними технічними характеристиками:

$$P_n = 3,0 \text{ кВт};$$

$$n_n = 1410 \text{ об/хв};$$

$$I_n = 6,7 \text{ А};$$

$$\text{ККД} = 82\%;$$

$$\cos\varphi = 0,83;$$

$$I_{\text{пуск}}/I_{\text{н}} = 7.$$

Для захисту двигуна слід обирати автоматичний вимикач, електромагнітний пускач, теплове реле та кнопковий пост. При визначенні характеристик пристроїв захисту та управління для електродвигунів важливо враховувати пусковий струм двигуна.

$$I_{\text{пуск}} = K_{\text{д}} \cdot I_{\text{н}} \quad (3.6)$$

де $K_{\text{д}}$ — кратність пускового струму.

Маємо $I_{\text{пуск}} = 7 \cdot 6,7 = 46,9$ А.

Для захисту електродвигуна вибираємо запобіжник типу ПРС-63УЗ-3 з плавкою вставкою ПВД-11-20УЗ, ТУ 16.522.112-74. [6]

3.5.1. Вибір автоматичного вимикача.

Автоматичні вимикачі призначені для рідкісного включення електричних кіл, забезпечення проходження струму в штатному режимі та автоматичного вимкнення у разі короткого замикання, перевантаження або критичного зниження напруги.

Під час вибору автоматичного вимикача враховуються тип струму, кількість полюсів, вид розчіплювачів, ступінь захисту та кліматичне виконання.

$$\begin{aligned} U_{\text{ав.н}} &\geq U_{\text{м}}; \\ I_{\text{ав.н}} &\geq I_{\text{дв.н}}; \\ I_{\text{розч}} &\geq I_{\text{дв.н}}; \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$I_{\text{відс}} = K_{\text{з}} \cdot K_{\text{ру}} \cdot K_{\text{рс}} \cdot K_{\text{і}} \cdot I_{\text{дв.н}};$$

де $U_{\text{ав.н}}$ — номінальна напруга автоматичного вимикача;

$U_{\text{м}}$ — напруга мережі;

$I_{\text{ав.н}}$ — номінальний струм автоматичного вимикача;

$I_{\text{дв.н}}$ — номінальний струм двигуна;

$I_{\text{розч.н}}$ — номінальний струм розчіплювача;

$I_{\text{відс}}$ — струм відсічки

$K_{\text{з}}$ — коефіцієнт запасу, $K_{\text{з}} = 1,1$;

K_{py} — коефіцієнт, що враховує відхилення пускового струму від каталожних значень; $K_{py} = 1,25$;

K_{pc} — коефіцієнт, що враховує відхилення пусковою струму від каталожних значень; $K_{pc} = 1,2$;

K_i — кратність пускового стуму за каталожними даними.

В нашому випадку маємо

$$U_{ав.н} \geq 380В;$$

$$I_{ав.н} \geq 6,7А;$$

$$I_{розч.н} \geq 6,7А;$$

$$I_{відс.} \geq 1,1 \cdot 1,25 \cdot 1,2 \cdot 7 \cdot 6,7 = 77,785А.$$

Даним вимогам відповідає автоматичний вимикач ВА5І-25-34, ТУ 16-522.157-83; на номінальний струм $I_n = 25А$; струм розчіплювачів $I_{розч.н} = 8А$; струм відсічки $I_{відс.} = 10 \cdot I_n$.

3.5.2. Вибір електромагнітних пускачів.

Електромагнітні пускачі використовуються для дистанційного запуску трифазних асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором, безпосередньо підключених до електромережі, а також для їхнього зупинення та зміни напрямку обертання. У разі оснащення електротепловим реле пускачі забезпечують захист двигунів від тривалих перевантажень, які можуть завдати шкоди.

Вибір електромагнітних пускачів здійснюється з урахуванням їхнього призначення, конструктивних особливостей, наявності теплового реле, рівня захисту та адаптованості до кліматичних умов, залежно від вимог експлуатації.

$$U_{мп.н} \geq U_m; I_{мп.н} \geq I_{дв.н}; \quad (3.8)$$

де $U_{мп.н}$ - номінальна напруга магнітного пускача;

$I_{мп.н}$ - номінальна сила струму магнітного пускача.

$$U_{мп.н} \geq 380В;$$

$$I_{мп.н} \geq 6,7 А.$$

Вибираємо магнітний пускач ПМЛ-122004А (ТУ 16-644.001-83):
неревверсивний з тепловим реле, з одним замикаючим контактом допоміжного кола, номінальний струм головного кола $I_n = 10$ А.

3.6. Обґрунтування та вибір проводок.

Для стаціонарних електропроводок найчастіше використовують проводи та кабелі з алюмінієвими жилами, як-от АПВ, АППВ, АВТУ, а також кабелі типу АВВГ чи АПВГ. У випадках приєднання до електротехнічних пристроїв, встановлених на віброізолюючих опорах, при внутрішньому монтажі у щитових пристроях, при зарядці освітлювальної арматури, а також для електропроводок у вибухонебезпечних зонах перевагу надають проводам і кабелям із мідними жилами. Для переносних і пересувних електроспоживачів використовують гнучкі шнури та кабелі з мідними жилами. Внутрішні проводки мають бути максимально короткими, тому особливо важливим є правильний вибір схеми їх прокладання. Перетин струмопровідної жили проводу, шнура чи кабелю підбирається з урахуванням гранично допустимого нагрівання та забезпечення достатньої механічної міцності. При визначенні кількості проводів, прокладених в одній трубі, нульовий робочий провід зазвичай не враховують. Площу поперечного перерізу жил обирають відповідно до тривало допустимого струмового навантаження.

$$I_{\text{тр, доп}} \geq I_{\text{розр}}, \quad (3.9)$$

де $I_{\text{розр}}$ – розрахунковий струм ділянки електричної мережі, А.

Для відгалужень до окремих електроспоживачів за максимальні тривалі робочі струми беруть їх номінальні струми, які визначають за формулою для трифазних споживачів:

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{10^3 \cdot P_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot \cos \varphi_{\text{НОМ}}}, \quad (3.10)$$

Розраховуємо проводи для підключення електродвигуна до мережі:

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{10^3 \cdot 3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,83} = 5,49 \text{ А}$$

Вибираємо один трижильний алюмінієвий провід марки АППВ,
прокладений у трубі, з площею поперечного перерізу струмоведучих жил $2,5\text{мм}^2$.

Для підключення термоперетворювача опору марки ТСМ 012-014
застосуємо провід МГТФЭ.

4. ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

Автоматизація технологічних процесів повинна сприяти збільшенню обсягів виробництва продукції, підвищенню продуктивності праці (шляхом зниження трудових витрат), зменшенню енергоємності, зниженню собівартості продукції та скороченню термінів окупності капіталовкладень.

Основним інтегральним показником ефективності капітальних вкладень у розвиток автоматизації виступають зведені розрахункові витрати. Цей показник враховує річні експлуатаційні витрати та частку капіталовкладень, розподілену на один рік. Розрахунок зведених витрат здійснюється за спеціальною формулою:

$$B_{зв} = C + E_n \cdot K \quad (4.1)$$

де $B_{зв}$ - зведені витрати, грн / рік;

C - річні експлуатаційні витрати, грн / рік;

K - капітальні витрати, грн;

E_n - нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень, рік⁻¹

($E_n = 0,15$).

До складу експлуатаційних витрат входять:

- витрати на оплату праці персоналу (C_3);
- відрахування на амортизацію (включаючи капітальний ремонт і реновацію)

відповідного обладнання, приладів і засобів автоматизації (C_a);

- витрати на поточний ремонт ($C_{пр}$);
- оплата енергоресурсів (C_e);
- інші прямі витрати (C_d).

Витрати на оплату праці персоналу, який займається обслуговуванням та експлуатацією систем автоматизації, розраховуються, виходячи з трудовитрат і погодинних ставок, враховуючи різні надбавки та доплати. У межах навчальних проєктів ці витрати умовно прийнято фіксувати на рівні $C_3 = 1,2$ грн/рік. Амортизаційні відрахування визначаються процентною часткою від балансової

вартості обладнання, приладів та засобів автоматизації, при цьому використовується показник $C_a = 14,2\%$.

Витрати на поточний ремонт техніки також розраховуються у відсотках від балансової вартості обладнання.

Що стосується енергоресурсів, витрати на електроенергію встановлюються за розміром втрат електроенергії та чинними тарифами для виробничих потреб. У навчальних прикладах ці витрати умовно приймаються на рівні 0,1 грн/рік.

$$C_c = P \cdot \Gamma \cdot 0,1 \text{ грн/рік} \quad (4.2)$$

де P - потужність двигуна, кВт;

Γ - кількість годин роботи на рік, год.

Таким чином річні експлуатаційні витрати будуть складати

$$C = C_z + C_a + C_{пр} + C_{л} \quad (4.3)$$

Інші прямі витрати приймають рівними 1% від загальної суми експлуатаційних витрат. Таким чином

$$C = \sum C_i \cdot 1,01 \quad (4.4)$$

При розрахунку капітальних вкладень слід врахувати такі складові:

- витрати на технологічне обладнання автоматики (K_3);
- торговельно-транспортні та складські витрати ($K_{гг}$);
- витрати на монтаж технічних пристроїв ($K_{н}$);
- прокладку внутрішньої електропроводки ($K_{цр}$);
- додаткові капітальні витрати, пов'язані з впровадженням автоматизації (K_i).

Витрати на придбання механічних засобів визначаються за оцінками, номенклатурними довідниками та іншими джерелами інформації. Для отримання вартості у гривнях потрібно помножити значення на коефіцієнт 5,5 грн.

Торговельно - транспортні витрати приймають в середньому рівними 11% від вартості технічних засобів ($K_{тт} = 0,11 \cdot K_3$).

Витрати на монтажні роботи слід розраховувати відповідно до чинних цінників на монтажні послуги. Як правило, вважається, що вони становлять близько 15–20 % від вартості технічного обладнання, яке підлягає монтажу.

$$(K_M = 0,15 \dots 0,020 \cdot K_3).$$

Вартість прокладання проводки охоплює ціну кабелю та його монтаж. У практичних розрахунках вважається, що ціна прокладання одного метра кабелю відкритим способом становить від 2,6 до 5,4 грн, а в трубі – 15 грн. Інші витрати зазвичай складають 2 % від загальної суми капітальних вкладень. Вартість прокладання проводки охоплює ціну кабелю та його монтаж. У практичних розрахунках вважається, що ціна прокладання одного метра кабелю відкритим способом становить від 2,6 до 5,4 грн, а в трубі – 15 грн. Інші витрати зазвичай складають 2 % від загальної суми капітальних вкладень.

$$(K_H = 0,02 \cdot K_3).$$

В даному випадку загальна вартість технічних засобів автоматизації становить;

$$K_d = K_{дат} + K_p + K_{вм} \quad (4.5)$$

де, $K_{дат}$ - вартість датчика, $K_{дат} = 50$ грн;

K_p - вартість регулятора ТРМ34, $K_p = 1800$ грн;

$K_{вм}$ - вартість виконавчого механізму, $K_{вм} = 200$ грн.

Отже, $K_3 = 50 + 1800 + 200 = 2500$ грн.

Торгівельно - транспортні витрати будуть становити:

$$K_{тт} = 0,11 \cdot 2050 = 225,5 \text{ грн};$$

Витрати на монтаж технічних засобів становлять:

$$K_M = 0,17 \cdot K_3 = 0,17 \cdot 2050 = 348,5 \text{ грн};$$

Інші капітальні витрати будуть становити 2 % від суми капітальних вкладень:

$$K_i = 0,02 \cdot 2050 = 41 \text{ грн}.$$

Визначивши суму капітальних вкладень, що дорівнює:

$$K = K_i + K_M + K_{тт} + K_3 = 2050 + 222,5 + 348,5 + 41 = 2666,5 \text{ грн} \quad (4.6)$$

Можна знайти відрахування на амортизацію:

$$C_a = 142 \cdot K = 0,142 \cdot 2666,5 = 378,6 \text{ грн}.$$

Витрати на поточний ремонт становлять :

$$C_{п,р} = 0,18 \cdot K = 0,18 \cdot 2666,5 = 479,97 \text{ грн.}$$

Витрати на енергоресурси будуть становити:

$$C_e = P_{\text{пот}} \cdot \Gamma \cdot 0,1, \quad (4.7)$$

де $P_{\text{пот}}$ - споживана потужність системи автоматизації, кВт, $P_{\text{пот}} = 2$ кВт;

Γ - кількість годин роботи, $\Gamma = 140 \cdot 8 = 1120$ год. Зерносушарка працює сезонно, приблизно 5 місяців, тобто, не враховуючи вихідних днів, 140 днів.

$$\text{Отже, } C_e = 2 \cdot 1120 \cdot 0,1 = 224 \text{ грн.}$$

Витрати на оплату праці персоналу, який зв'язаний з експлуатацією системи автоматики (в нашому випадку 1 оператор і 1 наладчик), становлять:

$$C_3 = 2 \cdot 1,3 \cdot 140 \cdot 8 = 2912 \text{ грн.}$$

де, 2 - кількість операторів і наладчиків, чол.;

1,2 - ставка оператора та наладчика за годину роботи, грн/год;

140 - кількість днів роботи за рік;

8 - кількість робочих годин на добу;

Отже, річні експлуатаційні витрати будуть становити;

$$C = C_a + C_{п,р} + C_e + C_3 = 378,6 + 479,97 + 224 + 2912 = 3994,57 \text{ грн} \quad (4.8)$$

Знайшовши річні експлуатаційні витрати та капітальні вкладення, можна знайти зведені витрати:

$$B_{зв} = C + E_n \cdot K = 3994,57 + 0,15 \cdot 2666,5 = 4304,945 \text{ грн.}$$

Тоді чистий прибуток визначається за формулою:

$$\text{Ч} = \Delta C_3 + \Delta C_e \quad (4.9)$$

де, ΔC_3 – прибуток за рахунок економії заробітної плати, грн;

ΔC_e – прибуток за рахунок економії електричної енергії, грн.

$$\Delta C_3 = C_3 - (1,2 \cdot \Gamma \cdot n_{\text{роб}} \cdot 0,1) = 2912 - (1,2 \cdot 1120 \cdot 2 \cdot 0,1) = 2643,2 \text{ грн} \quad (4.10)$$

$$\Delta C_e = C_e - (p \cdot \Gamma \cdot 0,1 \cdot \Delta \Pi) = 224 - 163,7 = 60,3 \text{ грн} \quad (4.11)$$

$\Delta \Pi = 0,4 = 40\%$ — економія часу енергоспоживання при автоматизації.

Тоді, $\text{Ч} = 2643,2 + 60,3 = 2703,5$ грн.

Термін окупності установки дорівнюватиме:

$$T = K / \text{Ч} = 2666,5 / 2703,5 = 0,98 \text{ року} \quad (4.12)$$

Отже, з вище проведених розрахунків ми бачимо, чистий прибуток складає 2703,5 грн, а саме встановлення засобів автоматики окупається майже за 1 рік.

ВИСНОВКИ

У цій магістерській роботі проведено дослідження зерносушарки СЗСБ-8 і розроблено систему автоматизованого регулювання температури теплоносія. Практичний досвід впровадження автоматизації технологічних процесів у сільському господарстві демонструє підвищення продуктивності праці, зменшення енергоємності виробництва на 15–20% і зниження собівартості продукції на 10–20%.

В роботі розглянуто систему автоматичного регулювання температури сушильного агенту в барабанній зерносушарці. Розрахунки показали, що впровадження системи автоматизованого регулювання сприяє покращенню економічних показників, зменшенню витрат палива, скороченню поточних витрат на заробітну плату та матеріали, а також збільшенню доходів за рахунок зниження енергетичних витрат і собівартості продукції. З екологічної точки зору автоматизація виявилася доцільною, оскільки споживання дизельного палива скоротилося майже вдвічі, а установка окупилася протягом двох років.

Ці результати свідчать про необхідність активного впровадження систем автоматизації в різноманітні технологічні процеси. Комплексна автоматизація виробничих процесів сприяє не лише підвищенню ефективності підприємств, а й зростанню валового внутрішнього продукту, що позитивно впливає на економічний розвиток країни загалом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Мартиненко І.І., Лисенко В.П., Тищенко Л.П., Лукач В.С. Проектування систем електрифікації та автоматизації сільського господарства. – К.: Вища школа, 1999. -202с.
2. Мартиненко І.І., Лисенко В.П., Проектування систем автоматики. — М.: Агропромвидав., 1990. -223 с.
3. Мартиненко І.І., Головінський Б.Л., Лисенко В.П., Мартиненко О.І., Решетюк В.М. Автоматизація технологічних процесів сільськогосподарського виробництва. - К.: Урожай, 1995. - 224 с.
4. М.Т.Шарамок, О.С.Марченко, П.М.Гоцуляк. Довідник по електромонтажу і налагодженню електророботобудування в сільському господарстві. -К.: Вища школа, 1999. -201 с.
5. Автоматизація типових технологічних процесів: технологічні об'єкти керування та схеми автоматизації [Текст]: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл., які навчаються за напрямом «Автоматизація і комп'ют.-інтегр. технології / М. В. Лукінюк. – К.: НТУУ «КПІ», 2008. – 236 с.: іл.
6. Бабіченко, А. К. Промислові засоби автоматизації [Текст]: навч. посіб.: У 2 ч. / А. К. Бабіченко, В. І. Тошинський, В. С. Михайлов та ін.; за заг. ред. А. К. Бабіченка. – Х.: НТУ «ХПІ», 2003. – Ч. 1. Вимірювальні пристрої. – 470 с. – Бібліогр.: с. 467.
7. 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.
8. 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.

9. Комарчук, Д.С., Режими роботи електротехнологічного комплексу з системою автоматичного управління для теплової обробки зерна ріпаку [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. / Комарчук Дмитро Сергійович; Кабінет Міністрів України, Нац. ун-т біоресурсів і природокористування України. – Київ, 2014. – 22 с.: рис.
10. Лисенко В.П., Решетюк В.М., Цигульов І.Т. Основи автоматики: 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.