

Центральноукраїнський національний технічний університет  
Факультет будівництва, транспорту та енергетики  
Кафедра «Автоматизації виробничих процесів»

«Допущено до захисту»

Зав. кафедри АВП

к.т.н., доцент

\_\_\_\_\_ Олександр ДІДИК

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**за другим (магістерським) рівнем вищої освіти**

**на тему**

**«Розробка та дослідження системи автоматичного  
регулювання температури зберігання зерна на  
елеваторі»**

Виконав здобувач ІІ курсу групи АК-24М  
ОПП «Автоматизація та комп'ютерно-  
інтегровані технології»  
спеціальності 174 «Автоматизація,  
комп'ютерно-інтегровані технології та  
робототехніка»

\_\_\_\_\_ Роман НЕКЛЕСА

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

Керівник проекту

доцент, канд.техн.наук

\_\_\_\_\_ Дмитро ТРУШАКОВ

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

Рецензент

\_\_\_\_\_ Іван САВЕЛЕНКО

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра автоматизації виробничих процесів

Рівень вищої освіти магістр

Галузь знань 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації

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

Освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Дідик О.К.

“ ” \_\_\_\_\_ 2025 року

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ  
ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ  
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

*Неклеси Романа Віталійовича*

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка та дослідження системи автоматичного регулювання температури зберігання зерна на елеваторі

2. Керівник роботи Трушаков Дмитро Володимирович, канд. техн. наук, доцент,  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту 02.12.2025 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи Розробити та дослідити систему автоматичного регулювання температури зберігання зерна на елеваторі 1. Огляд технології зберігання зерна; 2. Розробка структурної схеми системи автоматичного регулювання; 3. Проектування системи автоматичного регулювання; 4. Практична реалізація системи автоматичного регулювання.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>Жесан Р.В.</i>		

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Огляд технології зберігання зерна</i>	<i>15.10.25</i>	
2.	<i>Розробка структурної схеми системи автоматичного регулювання</i>	<i>30.10.25</i>	
3.	<i>Проектування системи автоматичного регулювання</i>	<i>15.11.25</i>	
4.	<i>Практична реалізація системи автоматичного регулювання</i>	<i>30.11.25</i>	

Дата видачі завдання 01.09.2025 р.

Керівник роботи \_\_\_\_\_ Д.В. Трушаков «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

Завдання прийнято до виконання

Здобувач \_\_\_\_\_ Р.В. Неклеси «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

## Анотація

на випускну кваліфікаційну роботу студента групи АК-24М Неклеси Романа Віталійовича зі спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» на тему: «Розробка та дослідження системи автоматичного регулювання температури зберігання зерна на елеваторі».

Випускну кваліфікаційну роботу присвячено дослідженню забезпечення якості зберігання зернової маси в силосах елеватора шляхом застосування активного вентилявання охолодженим повітрям. У роботі розроблено структурну схему системи автоматичного регулювання та виконано синтез регуляторів. За результатами аналізу обрано регулятор, який забезпечує найкращі показники стабілізації температури. Для вибраного оптимального регулятора розроблено алгоритм програмної реалізації, а також принципову електричну схему на основі однокристального мікроконтролера з відповідними пристроями введення та виведення інформації для підключення датчиків і керування виконавчим механізмом. Крім того, у середовищі Simulink створено модель системи автоматичного регулювання, за допомогою якої досліджено вплив вологості на якість температурного регулювання зернової маси в силосі елеватора.

**Ключові слова:** зберігання зерна, активне вентилявання, синтез регулятора, алгоритм програмної реалізації.

## Summary

on final qualification work of the student of group AK-24M Roman Neklesa on a speciality 174 «Automation, computer-integrated technologies and robotics» on the theme: «Development and research of an automatic grain storage temperature control system at a grain elevator».

The final qualified robot is assigned to ensure the safe preservation of grain mass in the silos of the elevator by stagnation of active ventilation and cooling air. The robot has broken down the block diagram of the automatic control system and the synthesis of regulators. Based on the results of the analysis, a regulator is selected that will provide the best indicators of temperature stabilization. For the selected optimal controller, a software implementation algorithm has been developed, as well as a basic electrical circuit based on a single-chip microcontroller with various devices for entering and displaying information for connecting sensors and heating. by the viconic mechanism.

In addition, Simulink has created a model of an automatic control system, which monitors the flow of moisture into the temperature control tank of the grain mass in the elevator silo.

**Key words: grain conservation, active ventilation, regulator synthesis, software implementation algorithm.**

## ЗМІСТ

Вступ.....	2
1 Методи та процеси зберігання зерна.....	5
1.1 Характеристика елеваторного комплексу .....	6
2 Розробка схеми автоматизованої системи регулювання.....	10
2.1 Об'єкт регулювання.....	10
2.2 Вибір сенсора .....	17
2.3 Вибір вентилятора.....	19
2.4 Вибір приводного механізму .....	22
2.5 Структурна схема автоматичної системи регулювання.....	24
3 Розробка системи автоматичного керування .....	26
3.1 Розробка системи охолодження зерна у силосі елеватора .....	26
3.2 Оцінка ефективності розв'язання задачі регулювання .....	33
4 Впровадження системи автоматичного керування на практиці.....	39
4.1 Обґрунтування часу дискретизації.....	39
4.2 Обчислення Z-перетворення передаточної функції регулятора .....	41
4.3 Опис електричної принципової схеми регулятора .....	43
4.4 Аналіз впливу вологості на тепловий стан зернової маси.....	50
Висновки .....	57
Список літератури .....	58
Додаток А.....	61

## Вступ

У сучасних умовах ринкової економіки дедалі більшого значення набуває не лише процес вирощування зернових культур, а й організація ефективного та надійного зберігання зерна після збирання врожаю. Саме якісне зберігання дозволяє зберегти основні фізико-хімічні та біологічні властивості зерна, запобігти його псуванню та втратам, а також забезпечити можливість реалізації продукції у найбільш сприятливий з економічної точки зору період. Крім того, правильні умови зберігання дають змогу формувати довготривалі запаси зерна, зберігаючи його схожість і здатність до проростання протягом тривалого часу.

Для забезпечення ефективного зберігання зернової маси необхідно здійснювати постійний контроль основних параметрів, зокрема температури та вологості. Зерно, як правило, надходить на складські приміщення або елеватори вже після сушіння з вологістю не більше 14%, що є допустимим значенням для тривалого зберігання. За умов низьких температур процеси тепло- та вологообміну в зерновій масі відбуваються повільно, що сприяє стабільності її стану. Проте підвищення температури може призвести до інтенсифікації біологічних процесів, унаслідок чого зростає ризик погіршення якості зерна.

Особливо небезпечним є перевищення допустимих температурних значень, оскільки це може спричинити процес самозігрівання зернової маси. Під час самозігрівання відбувається різке підвищення температури та вологості, активізується розвиток мікроорганізмів і плісняви, що в короткий термін призводить до значних втрат якості та товарної цінності зерна. Тому підтримання оптимального температурного режиму є одним із ключових завдань при зберіганні зерна в силосах елеватора.

З метою розв'язання зазначеної проблеми в роботі пропонується використання системи автоматичного регулювання температури зернової маси. Така система передбачає охолодження зерна в силосах елеватора

шляхом активного вентилявання холодним повітрям, а також безперервний контроль вологості. Автоматизація процесу дозволяє своєчасно реагувати на зміну параметрів зернової маси, забезпечити стабільні умови зберігання та значно зменшити вплив людського фактора, що в підсумку підвищує ефективність і надійність роботи елеватора.

**Мета дослідження.** Підвищення якості зберігання зерна шляхом активного вентилявання холодним повітрям та створення системи автоматичного регулювання температури зерна в силосах елеватора.

Для реалізації поставленої мети дослідження були визначені та виконані такі завдання:

- .. проаналізувати умови та особливості зберігання зернової маси в силосах елеватора і фактори, що впливають на зміну її температури та вологості;
- .. дослідити існуючі методи та засоби охолодження зерна і системи автоматичного регулювання температури;
- .. виконати математичне моделювання об'єкта керування та синтез регуляторів;
- .. розробити алгоритм програмної реалізації системи автоматичного регулювання.

**Об'єктом дослідження** є процес зберігання зернової маси в силосах елеватора з активним вентиляванням, зокрема теплові та вологісні процеси, що відбуваються в зерні під час зберігання.

**Предметом дослідження** є система автоматичного регулювання температури зернової маси в силосах елеватора, а також методи і алгоритми керування процесом охолодження зерна шляхом активного вентилявання з урахуванням впливу вологості.

**Методи дослідження.** У роботі застосовано методи аналізу та узагальнення науково-технічної літератури, системного аналізу процесу зберігання зернової маси, математичного та імітаційного моделювання,

синтезу й аналізу регуляторів, а також порівняльного аналізу результатів досліджень з використанням середовища Simulink.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає у можливості використання розробленої системи автоматичного регулювання температури зернової маси в силосах елеватора для підвищення ефективності та надійності процесу зберігання зерна. Запропоновані алгоритм керування, структурна та принципова електрична схеми можуть бути використані при проектуванні та модернізації елеваторних комплексів, що дозволяє зменшити втрати зерна, запобігти процесам самозігрівання та покращити якість зберігання продукції.

## 1 Методи та процеси зберігання зерна

Елеватор — це повністю автоматизоване зерносховище, призначене для зберігання зерна та проведення необхідних технологічних операцій. Сучасні елеватори забезпечують високу ефективність усіх процесів і надійне збереження зерна. На відміну від складів із фіксованою механізацією, елеватори відрізняються компактністю завдяки великій висоті споруд, що значно підвищує місткість на одиницю площі. У типовому зерносховищі на 1 тону зерна припадає 2,5–3 м<sup>3</sup> приміщення, тоді як у елеваторах — лише 1,5–1,7 м<sup>3</sup>.

Елеватор, як повністю механізоване зерносховище, призначений для виконання всіх операцій із завантаження та розвантаження, повної технологічної обробки та зберігання зерна. Він являє собою комплекс споруд та обладнання, який включає: робочу башту з технологічними та транспортними механізмами; силосний корпус із транспортним обладнанням; пристрої для приймання зерна з автомобілів, вагонів та суден; обладнання для відвантаження зерна на різні види транспорту та переробні підприємства; цех для утилізації відходів; системи аспірації та видалення відходів.

Робоча башта елеватора має висоту від 50 до 65 м і вміщує на своїх поверхах високопродуктивні зерноочисні агрегати, аспіраційні пристрої, автоматичні ваги, а іноді й зерносушарки. Зерно зберігається у силосах заввишки понад 30 м. Місткість елеватора визначається кількістю силосів, їхньою висотою та поперечним перерізом. Силоси виготовляють із монолітного або збірного залізобетону і можуть бути циліндричними або прямокутними. Їхня об'ємна місткість зазвичай становить від 150 до 600 т, тоді як загальна місткість елеваторів коливається від 27 до 150 тис. т залежно від призначення та розташування об'єкта.

Технологічні схеми елеваторів залежать від їх призначення — заготівельні, млинові, перевалочні або портові — і відрізняються між собою. Загалом процес руху зерна на елеваторі виглядає так: зерно з приймальних

пунктів, вагонів або суден потрапляє у приймальну яму, розташовану нижче рівня землі під баштою. Потім потужні ковшові норії (продуктивністю 100–175 т/год кожна) піднімають його до верхньої частини башти, де воно проходить через автоматичні ваги і далі самопливом надходить на зерноочисні машини, розташовані на різних поверхах. За потреби зерно після очищення може направлятися до зерносушарки.

Після очищення та сушіння зерно знову піднімають на верхні поверхи елеватора, де розподільні механізми направляють його на стрічкові конвеєри над силосами. Переміщуючись конвеєрами, зернова маса потрапляє у відповідний силос для зберігання. З силосу зерно самопливом (після відкриття заслінки) потрапляє на стрічки підсилосного конвеєра, а далі — у відпускні силоси та на обладнання для завантаження в автомобілі, вагони чи судна.

### **1.1 Характеристика елеваторного комплексу**

Запроектвані будівлі та споруди призначені для приймання та очищення зерна, його зберігання й подачі до виробничого корпусу для переробки насіння.

Основні технічні характеристики сховища:

- вантажопідйомність автомобілерозвантажувача — 15 т;
- продуктивність обладнання для очищення зерна — 50 т/год.
  - Виробничі будівлі та споруди включають:
- приймальний пристрій для зерна з автотранспорту;
- відділення очищення зерна;
- металеві силоси для зберігання зерна: 476,1 x 3 м<sup>3</sup>, 84,8 x 4 м<sup>3</sup>, 43,87 м<sup>3</sup>;
- норійні башти;
- операторську.

Технологічний процес функціонування сховища включає такі етапи:

- завантаження зерна у сховище;
- вивантаження зернової маси.

#### Завантаження сховища

Зерно доставляють до сховища автомобільним транспортом. Після лабораторної перевірки та отримання позитивного висновку його направляють на автомобілерозвантажувач.

За допомогою автомобілерозвантажувача зерно вивантажується з автотранспорту у приймальний бункер.

Контроль за прийомом зерна здійснює машиніст автомобілерозвантажувача.

З приймального бункера зерно подається на норію, яка транспортує його до комплексного барабанного сепаратора.

Сепаратор призначений для видалення з зерна легких, дрібних та великих домішок за допомогою повітряних потоків і решіт.

Після очищення зерно самопливом потрапляє в бункер для очищеного зерна, звідки його можна завантажити в автотранспорт через ручну засувку або, після відкриття електрозасувки, направити самопливом на норію.

Норія через поворотну трубу самопливом подає зерно у металеві силоси або безпосередньо в автотранспорт.

Контроль процесу завантаження насіння здійснюється за допомогою датчиків рівня.

#### Вивантаження зерна

З силосів зерно вивантажується шляхом відкриття електрозасувок і через перекидний клапан подається на стрічкові конвеєри. Стрічковий конвеєр транспортує зерно на порційні ваги-дозатори, з яких через підваговий бункер зерно надходить на норію, яка самопливом подає його в приймальний бункер виробничого корпусу для переробки насіння.

Зерно транспортується за допомогою стрічкових конвеєрів: спочатку на основний конвеєр, далі — через перекидний клапан на норію або інший конвеєр. Вивантаження зерна з силосів здійснюється через відкриття

електрозасувок, після чого воно надходить на стрічковий конвеєр для подальшого транспортування.

Вивантаження зерна з силосів здійснюється через відкриття електрозасувок на стрічковий конвеєр.

Передбачена також можливість перевантаження зерна з одного силосу в інший.

Для забезпечення безпечних умов праці персоналу та нормальної роботи технологічного обладнання, відповідно до «Правил техніки безпеки і виробничої санітарії на підприємствах зберігання і переробки зерна», у проекті передбачено створення аспіраційної мережі.

Пил, який відсмоктується вентилятором аспіраційної мережі АМ-1 від сепаратора, уловлюється циклонами і збирається в бункері для дрібних відходів.

Для очищення аспіраційного повітря використовуються батарейні циклони 4ББЦ з ефективністю очищення 98%.

Система технологічної аспірації синхронізована з відповідними технологічними лініями. Блокування електродвигунів здійснюється проти напрямку технологічного процесу, щоб запобігти завалам і підпорам обладнання.

При відключеній аспіраційній мережі експлуатація обладнання заборонена, а його пуск блокується.

Електродвигун вентилятора аспіраційної мережі зв'язаний з електродвигунами обладнання, яке знепильюється, так що запуск вентилятора відбувається на 15–20 секунд раніше запуску обладнання, а його зупинка — через 20–30 секунд після зупинки обладнання.

Всі елементи технологічного обладнання, самопливного транспорту та повітропроводів аспіраційної мережі ретельно герметизуються за допомогою гумових прокладок.

Вивантаження крупних і дрібних відходів з бункерів в автотранспорт проводиться періодично.

Крупні відходи, які переважно складаються з мінеральних та органічних домішок, вивозяться в місця, узгоджені з санітарними службами.

Дрібні відходи використовуються як корм для птахів або великої рогатої худоби та реалізуються замовникам за окремими договорами.

## **2 Розробка схеми автоматизованої системи регулювання**

В цій роботі об'єктом керування виступає зернова маса в силосі елеватора. Для регулювання температури необхідно враховувати залежність температури зерна від температури міжзернового повітря, яким проводиться охолодження. Для вимірювання температури слід обрати термодатчик, здатний надавати дані про стан температури по всьому об'єму силосу, оскільки розподіл температури в зерновій масі може бути нерівномірним і не залежати від висоти чи віддаленості від центру силосу. Температуру зерна потрібно лише знижувати; для цього використовується процес аерації, що передбачає вибір вентилятора для продування зернової маси та холодильної установки для зниження температури повітря, яке подається при активному вентиляванні.

### **2.1 Об'єкт регулювання**

Основні положення щодо ідентифікації багатовимірних сільськогосподарських об'єктів керування, в яких ключову роль відіграють процеси тепло- та масообміну.

Сільськогосподарські технологічні процеси, що автоматизуються, являють собою складні багатопараметричні системи з численними взаємозалежними показниками. Процеси в таких об'єктах керування відрізняються фізико-біологічною природою, призначенням і апаратурним оформленням, що робить їх досить складними. У цьому контексті важливо виділити класи об'єктів із подібними характеристиками, що дозволяє розробляти універсальні методи та алгоритми дослідження, а також стандартизовані підходи до побудови систем керування.

У сучасному сільському господарстві значну роль відіграють об'єкти, функціонування яких базується на процесах тепло- та масообміну. До таких об'єктів належать сушильні камери, тваринницькі приміщення з

контрольованим мікрокліматом, сховища сільськогосподарської продукції та інші. Незважаючи на різне призначення та конструктивні відмінності, усі ці об'єкти мають спільні особливості: наявність двох взаємозалежних параметрів — температури та вологості — що визначають їх технологічні властивості, а також необхідність підтримувати стабільний рівень тепло- та масообмінних процесів.

Перераховані різноманітні сільськогосподарські об'єкти керування можна об'єднати в один клас для дослідження їхніх статичних та динамічних властивостей, що дозволяє розробити єдиний підхід до їх автоматизації.

Варто зазначити, що при вивченні багатовимірних об'єктів керування з взаємозалежними параметрами важливо визначати не лише статичні та динамічні характеристики окремих контурів, а й оцінювати ступінь і форму взаємозв'язку між керованими величинами.

У зв'язку зі зростанням вимог до управління сільськогосподарськими технологічними процесами проблема ідентифікації набуває особливої важливості. Неможливо забезпечити ефективне керування системою, якщо її динамічні та статичні характеристики невідомі з достатньою точністю. Поряд з експериментальними методами дослідження властивостей тепло- та масообмінних процесів як об'єктів управління широко використовуються різноманітні аналітичні підходи, що базуються на різних формах представлення ідентифікаційних моделей — диференціальних та різницевих рівняннях, передатних функціях, функціях ваги, частотних характеристиках, градієнтних виразах тощо. Кожен метод має свої особливості та область застосування. Проте це не означає, що сучасна ідентифікація зводиться до набору готових рецептів для різних типів сільськогосподарських об'єктів керування; існує кілька характерних підходів, для яких застосовуються різні методи аналізу статичних і динамічних властивостей об'єктів.

Серед експериментальних методів дослідження статичних і динамічних властивостей цього класу сільськогосподарських об'єктів керування найбільше поширені методи, що використовують східчасті, імпульсні та

синусоїдальні форми вхідних сигналів. У останній час завдяки своїй універсальності різні регресійні методи також успішно застосовуються в інженерній практиці для ідентифікації сільськогосподарських об'єктів керування, пов'язаних з тепло- та масообмінними процесами.

Переходячи до процедури ідентифікації, варто коротко відзначити особливості динамічних властивостей досліджуваного класу багатовимірних сільськогосподарських об'єктів керування. Для цього виділяють три характерні групи, які насамперед відрізняються механізмом опису теплообмінних процесів.

До першої групи відносять об'єкти з тісним взаємозв'язком тепло- і масообмінних процесів. Прикладом є сушильні камери, де на всіх етапах сушіння сільськогосподарських культур чітко проявляється взаємодія цих процесів.

Об'єкти другої групи, до яких належать сховища сільськогосподарської продукції, відзначаються низькою інтенсивністю масообмінних процесів, що дозволяє частково ігнорувати вплив маси на теплообмін.

Третя група охоплює об'єкти з внутрішніми джерелами тепла і вологи, зокрема тваринницькі приміщення.

Виходячи з попереднього аналізу динамічних властивостей розглянутого класу багатовимірних сільськогосподарських об'єктів керування, дослідження проведемо окремо для кожної виділеної групи, враховуючи специфіку механізму тепло- та масообмінних процесів.

Як типові приклади об'єктів першої групи будуть розглянуті технологічний процес сушіння зерна в шахтній камері та процес активного вентилявання зерна.

Будуть досліджені статичні та динамічні властивості процесу активного вентилявання зерна як об'єкта автоматизованого керування.

Широке застосування комбайнового збирання зернових призводить до надходження великих обсягів зерна на післязбиральну обробку в стислі терміни. Висока вологість зернової маси значно прискорює природні

біохімічні процеси життєдіяльності зерна, що проявляються, як і у інших рослинних організмах, у диханні. Тому головною метою післязбиральної обробки є мінімізація дихання зерна без погіршення його посівних та продовольчих якостей.

Одним із ефективних методів післязбиральної обробки є активне вентилявання. Варто відзначити, що технологія активного вентилявання зерна за останні десятиліття зазнала значних змін. Спочатку використовувався лише природний обдув зернового насипу, пізніше впровадили повітропідігрівні та охолоджувальні рефрижераторні установки. Це дало змогу регулювати температуру вентиляваного повітря, перетворивши процес у ефективний метод сушіння та холодової консервації, який не залежить від погодних умов зовнішнього середовища.

Спершу розглянемо ключові особливості процесу вентилявання для сушіння насінного зерна, де його переваги особливо помітні. Насінний матеріал дуже чутливий до коливань температури, а установки активного вентилявання, як буде показано далі, забезпечують стабільний і оптимальний режим сушіння.

Сушіння зерна за допомогою активного вентилявання базується на принципі гігроскопічної рівноваги між вологістю зерна та відносною вологістю вентиляваного повітря. У режимі динамічної рівноваги відносна вологість повітря 62–70% відповідає вологості зерна близько 13–14%. Тому у вентиляваних бункерах для сушіння використовується зовнішнє або злегка підігрите повітря.

При вивченні статичних і динамічних властивостей процесу активного вентилявання зерна в якості основного використовуємо аналітичний метод. Адекватність отриманої математичної моделі буде перевірятися експериментально на діючих установках активного вентилявання.

Для спрощення аналізу процесу зроблено низку припущень, що дозволяють легше досліджувати його властивості. Зокрема, вважається, що волога в зерні перебуває у рідкому стані; її випар підпорядковується закону

Дальтона; тепло- і масообмін відбувається лише між сушильним агентом і зерном; температурний градієнт всередині окремих зерен малий і ним можна знехтувати; теплообмін між вентиляльованим повітрям і зерном відбувається за рахунок конвекції.

Застосовуючи балансові співвідношення, які описують нестационарний процес тепло- та масообміну в шарі вентиляльованого зерна, можна отримати наступну систему диференціальних рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial t}{\partial x} &= \frac{a_v S_v}{\varepsilon \gamma_B c_B \nu} (\Theta - t); \\ \frac{\partial \Theta}{\partial \tau} &= \frac{a_v S_v}{c_M \gamma_M} (t - \Theta) - \frac{r S_v \beta_v}{c_M \gamma_M} (p_M - p_B); \\ \frac{\partial d}{\partial x} &= \frac{S_v \beta_v}{\varepsilon_v \gamma_B} (p_M - p_B); \\ - \frac{\partial \omega}{\partial \tau} &= \frac{S_v \beta_v}{\gamma_M} (p_M - p_B); \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

де  $a_v$  — коефіцієнт теплообміну;  $S_v$  — питома поверхня матеріалу, що бере участь у тепло- і масообміні;  $\varepsilon$  — пористість зернової маси;  $\gamma_B$  — щільність повітря;  $c_B$  — питома теплоємність повітря;  $\nu$  — швидкість повітряного потоку;  $x$  — товщина шару вентиляльованого зерна;  $\Theta, t$  — температура зерна й повітря;  $r$  — теплота паротворення;  $c_M$  — питома теплоємність матеріалу;  $\gamma_M$  — щільність матеріалу;  $\beta_v$  — коефіцієнт випару;  $d$  — вологовміст повітря;  $p_M, p_B$  — парціальний тиск насиченої водяної пари в прикордонному шарі матеріалу й у навколишньому повітрі;  $\omega$  — вологість зерна; — час.

Завдання зводиться до визначення функцій  $t, \Theta, d, \omega$  в області зміни їхніх аргументів  $[0 \leq x < x_1]$ ;  $[0 < \tau < \infty]$  при наступних граничних умовах:

$$\left. \begin{aligned} t(\tau, 0) &= t_1(\hat{a}); d(\tau, 0) = d_1(\hat{a}) \\ \Theta(0, x) &= \Theta_1(\hat{a}) \quad \omega(0, x) = \omega_1 \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

Відомо, що швидкість вологовіддачі вологого матеріалу визначається різницею парціальних тисків пари на поверхні матеріалу та в навколишньому повітрі. Парціальний тиск на поверхні вологого матеріалу, у свою чергу, є складною нелінійною функцією температури та вологовмісту зерна, що робить систему диференціальних рівнянь нелінійною.

Проте в ряді випадків залежність парціального тиску пари на поверхні матеріалу можна з достатньою для інженерних розрахунків точністю апроксимувати лінійною функцією наступного вигляду:

$$p_M = \alpha + b\Theta + c\omega, \quad \bar{p}_B = ed = 1.13d \quad (2.3)$$

де  $a, b, c$  — постійні коефіцієнти; у діапазоні зміни  $d = 2 \dots 20$  г/кг сухого повітря коефіцієнт пропорційності становить  $e = 1,13$ .

$$\zeta = \frac{a_v S_v}{c_M \gamma_M} \tau - \text{відносний час};$$

$$z = \frac{a_v S_v}{v \gamma_B c_B \varepsilon} - \text{відносна товщина шару вентилязованого матеріалу};$$

$$\Theta^* = \frac{\Theta - \Theta_1}{t_1 - \Theta_1} - \text{нормована температура матеріалу};$$

$$t^* = \frac{t_1 - \Theta_1}{t_1 - \Theta_1} - \text{нормована температура повітря};$$

$$\mu_M = \frac{r}{c_B (t_1 - \Theta_1)} p_M - \text{нормований парціальний тиск насиченої водяної}$$

пари біля поверхні матеріалу;

$$\omega^* = \frac{r}{c_M (t_1 - \Theta_1)} \omega - \text{нормована вологість матеріалу};$$

$$\mu_B = \frac{r}{c_B (t_1 - \Theta_1)} p_B - \text{нормований парціальний тиск пари в}$$

навколишньому повітрі;

$$d^* = \frac{r}{c_B (t_1 - \Theta_1)} d - \text{нормований вміст вологи в повітрі};$$

Отримуємо таку систему рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \Theta^*}{\partial \zeta} &= t^* - \Theta^* - \frac{\beta_v c_B}{a_v} (\mu_M - \mu_B) \\ \frac{\partial t}{\partial z} &= \Theta^* - t - \\ \frac{\partial t}{\partial z} &= \frac{\beta_v c_B}{a_v} (\mu_M - \mu_B) \\ \frac{\partial \omega^*}{\partial \zeta} &= \frac{\beta_v c_B}{a_v} (\mu_M - \mu_B) \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

Після розв'язання та перетворення цієї системи рівнянь отримано передатні функції процесу активного вентилявання зерна. Для спрощення розрахунків ці функції були приведені до форми аперіодичних ланок.

$$W_{31}(p) = \frac{1}{2p^2 + 15p + 1} \quad (2.5)$$

$$W_{12}(p) = \frac{0.08}{2p^2 + 15p + 1} \quad (2.6)$$

$$W_{82}(p) = \frac{0.4}{60p + 1} \quad (2.7)$$

$$W_{71}(p) = \frac{0.9}{60p + 1} \quad (2.8)$$

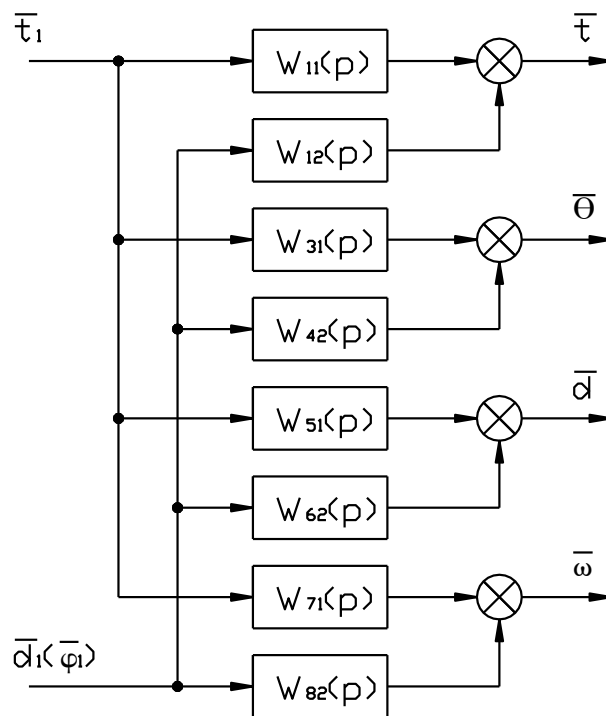


Рисунок 2.1 — Структурна схема процесу активного вентилявання зерна як об'єкта керування:

$t_1, \varphi_1$  – температура та відносна вологість повітря, що подається в установку;

$\Theta, \omega$  – температура та вологість вентилярованої зернової маси.

## 2.2 Вибір сенсора

Цифрова термopідвіска ТУР-01 призначена для безперервного контролю температури та рівня сипких матеріалів в елеваторах і наземних зерносховищах. Прилад може замінювати існуючі термopідвіски типів УДКТЭ, ДКТЭ-4МГ, М-5, МАРС-1500, ТП-015, а також встановлюватися на нові елеватори та інші технологічні ємності в складі систем автоматизованого керування (САК).

Термopідвіска ТУР-01, крім вимірювання температури продукту, виконує функцію рівнеміра, визначаючи поточний рівень сипкого середовища.

Вона складається з механічної та електрично з'єднаної частин, локального контролера та чутливого елемента (ЧЕ). ЧЕ виконаний у вигляді трубчастої оболонки з нержавіючої сталі 12Х18Н10Т або гнучкої пластикової оболонки, армованої двома сталевими тросами.

Всередині оболонки розміщений вимірювальний шлейф із термодатчиками, встановленими через кожний метр. Вони вимірюють температуру матеріалу в окремих зонах і передають кодовані сигнали.

Чутливий елемент одночасно виконує функцію ємнісного датчика рівня: всередині оболонки по всій її довжині розташовані електроди вимірювального конденсатора. Ємність датчика змінюється пропорційно рівню заповнення бункера через різницю діелектричної проникності повітря та сипучого матеріалу, у який занурений чутливий елемент.

Локальний контролер по черзі опитує термодатчики, зберігає отримані значення та передає їх на запит зовнішньої ЕОМ через інтерфейс RS485.

Для роботи термopідвіски в складі САК використовуються наступні технічні засоби:

- персональний комп'ютер, сумісний з IBM PENTIUM III;

- перетворювач інтерфейсів RS232/RS485;
- ретранслятор інтерфейсу RS485 (для кожних 32 пристрої понад перші 32);
- програмне забезпечення верхнього рівня.

Таблиця 2.1 — Основні технічні характеристики датчика

Напруга живлення	+18...36 В або 14...27 В, 50 Гц
Споживана потужність, не більше	3 ВА
Діапазон виміру:	
температури середовища	-40 °С ... +70 °С
рівня середовища	до 30 метрів
Похибка	
виміру температури	±1 °С
виміру рівня	±1%
Вихідний цифровий сигнал	RS-485
Умови експлуатації:	
температура навколишнього середовища	-30 °С ... +50 °С
відносна вологість	до 95% (при 35 °С)
вібраційні навантаження	5...80 Гц, 1 g
Ступінь захисту забезпечена оболонкою	IP65



Рисунок 2.2 — Зовнішній вигляд датчика

Передатна функція датчика має вигляд  $W_d = K_d$ ; оскільки сигнал датчика цифровий, а не аналоговий, приймаємо  $K_d = 1$ .

### 2.3 Вибір вентилятора

Виходячи з обсягу зерна, що потребує охолодження під час зберігання, обрано центробіжний вентилятор ВЦ-14-46-2.5 із двигуном постійного струму IGG5-108.

Відцентрові вентилятори ВЦ 14-46 виготовляються з вуглецевої сталі та призначені для переміщення повітря і газових сумішей, агресивність яких щодо вуглецевої сталі не перевищує агресивності повітря при  $+80^{\circ}\text{C}$ , і які не містять липких речовин, волокнистих матеріалів, а також пилу та інших твердих домішок у концентрації понад  $150 \text{ мг/м}^3$ .

Центробіжні вентилятори ВЦ 14-46В призначені для переміщення газопароповітряних вибухонебезпечних сумішей категорій ІІА та ІІВ, які не

спричиняють прискореної корозії вуглецевої сталі та алюмінію (швидкість корозії  $\leq 0,1$  мм/рік), із вмістом пилю та інших твердих домішок не більше  $0,1$  г/м<sup>3</sup>, за відсутності вибухових, липких речовин та волокнистих матеріалів і при температурі не вище  $80^{\circ}\text{C}$ .

Вентилятори не призначені для переміщення газо-пилеповітряних сумішей від установок, де вибухонебезпечні речовини нагріваються вище температури samozаймання або перебувають під надлишковим тиском.

Відцентрові вентилятори ВЦ 14-46 використовуються в стаціонарних системах опалення, кондиціонування повітря та вентиляції виробничих, громадських і житлових приміщень.

Вентилятор ВЦ 14-46 має спіральний кожух і лопаткове робоче колесо. Під час обертання колеса повітря, що потрапляє в канали між лопатками, рухається радіально до периферії, стискується і під дією відцентрової сили викидається в спіральний кожух, після чого надходить у нагнітальний отвір.

Робоче колесо виконане у вигляді порожнистого циліндра, на бічній поверхні якого паралельно осі обертання рівномірно розташовані лопатки. Колесо вентилятора ВЦ-14-46 має 34 загнуті вперед лопатки, встановлюється на вал електродвигуна і фіксується болтом.

Вентилятори ВЦ-14-46 можуть обертатися як праворуч, так і ліворуч.

Корпус вентилятора спіральний і допускає установку в будь-якому з шести положень із кроком  $45^{\circ}$ .

Габаритні та монтажні розміри вентиляторів ВЦ-14-46:

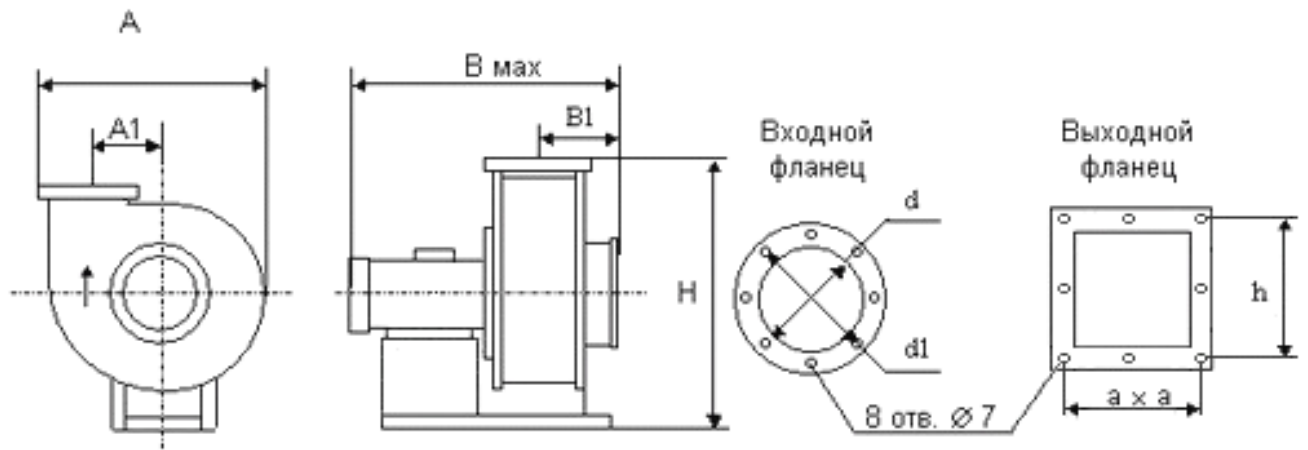


Рисунок 2.3 — Зовнішній вигляд вентилятора

Таблиця 2.2 — Габаритні розміри вентилятора

	A	B <sub>max</sub>	H	A1	B1	d	d1	a	h
ВЦ-14-46-2.5	479	466	512	160	140	250	280	17	205

Таблиця 2.3 — Технічні характеристики вентилятора ВЦ-14-46-2.5

Частота обертання робочого колеса вентилятора, об/хв	3000
Тип електродвигуна	АИР100L2
Потужність електродвигуна, кВт	5,5
Продуктивність, тис. м <sup>3</sup> /год.	3,9 - 5,0
Повний тиск ВЦ, Па	2050 - 1970
Маса ВЦ не більше, кг	48

Таблиця 2.4 — Технічні характеристики двигуна АИР100L2

Номінальна частота обертання валу, об/хв	1500
Синхронна частота обертання, об/хв	3000
Вихідна потужність, кВт	5,5
Вихідний момент Н*м	8,5-10,3
Струм статора, А	10,7
ККД	88
Коефіцієнт потужності	0,89

Іпуск./Іном.	7,5
Маса (кг)	31,5



Рисунок 2.4 — Зовнішній вигляд двигуна

#### **2.4 Вибір приводного механізму**

В системі кондиціонування повітря найбільше енергії споживається на охолодження проточного повітря порівняно з іншими способами його обробки.

У представленій схемі холодильної установки передбачено коливання температури кипіння в межах 275...280 К та температури конденсації в діапазоні 303...309 К. Схема досліджуваної холодильної установки наведена на рис. 2.5.

Типова холодильна установка розглядається як технічна система, для аналізу якої використовується підхід на основі термодинамічного потенціалу процесів перетворення енергії. Для оцінки енергоефективності обладнання застосовується узагальнений показник — ексергетичний коефіцієнт корисної дії ( $\eta_e$ ).

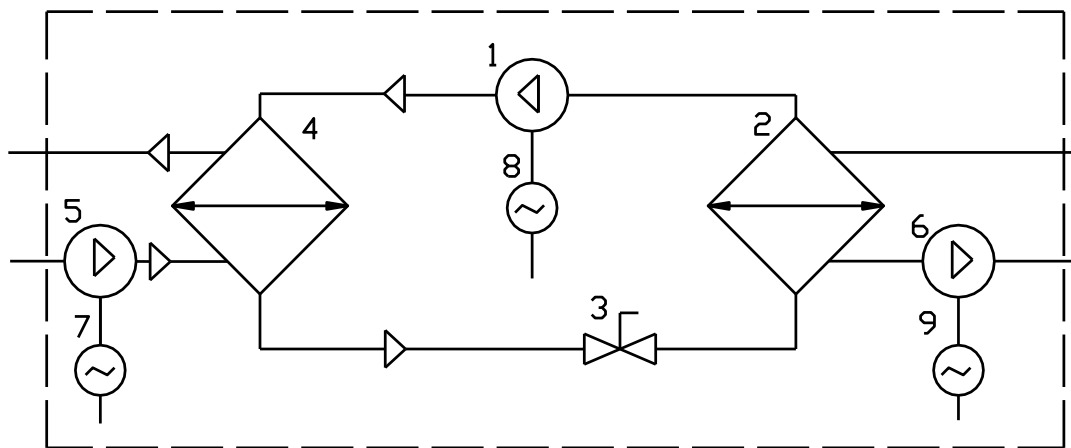


Рисунок 2.5 — Схема одноступеневої холодильної установки

- 1 — компресор;
- 2 — випарювач;
- 3 — пристрій для дроселювання;
- 4 — конденсатор;
- 5 — насос для охолоджувальної води;
- 6 — насос для розсолу;
- 7, 9 — електроприводи насосів;
- 8 — електропривод компресора

Застосування ексергетичного аналізу дає змогу визначити енергетично ефективний режим роботи автоматизованої холодильної установки шляхом техніко- та термодинамічного порівняння різних варіантів із подальшою термодинамічною оптимізацією режимів її функціонування.

При проведенні термодинамічного аналізу використано статичний підхід, за якого система на кожному етапі розглядається як перебуваюча в стаціонарному стані.

Ексергетичні втрати в холодильній установці обумовлені низкою чинників. Основними факторами, що впливають на  $\eta_e$ ,  $\epsilon$ : необоротні теплообміни між холодоагентом та робочим середовищем у випарнику, а також між холодоагентом та навколишнім середовищем підвищеного потенціалу в конденсаторі; стиск у компресорі перегрітої пари холодоагенту за необоротною полі-тропою замість оборотного стиску пари в ідеальній установці.

Підвищити  $\eta$  можливо завдяки впровадженню гнучкої системи керування агрегатами холодильної установки, яка враховує її конструктивно-технологічні особливості, насамперед — термодинамічний цикл установки. Зменшення тривалості процесу стиску підвищує його КПД, так само як і скорочення часу охолодження перегрітого газу до стану насичення.

Передатна функція холодильної установки представлена аперіодичними ланками першого порядку з відповідними коефіцієнтами передачі та постійними часу (Т).

$$W_{xx} = W_1 \cdot W_2 \quad (2.10)$$

$$\text{де, } W_1 = \frac{K_1}{1 + pT_1}; K_1=0.516 \quad T_1=1 \quad (2.11)$$

$$W_2 = \frac{K_2}{1 + pT_2}; K_2=-2,9 \quad T_2=6,2 \quad (2.12)$$

## 2.5 Структурна схема автоматичної системи регулювання

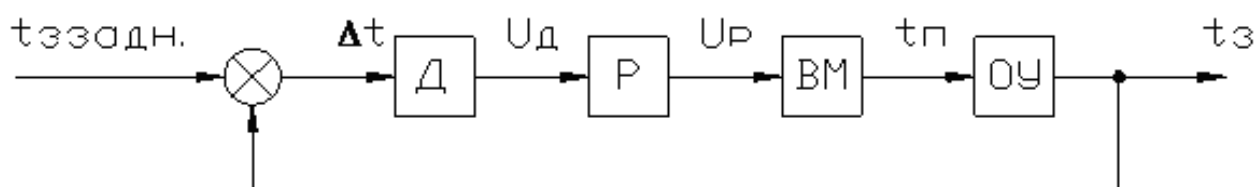


Рисунок 2.6 – Блок-схема автоматизованої системи регулювання (АСР)

Д – сенсор;

Р – пристрій регулювання;

ВМ – механізм виконання;

ОУ – керований об'єкт.

Як видно з рис. 2.6, температура зерна в бункері фіксується датчиком. Через великий об'єм зерна застосовуються термopідвіски ТУР-01, сигнал від яких передається на цифровий регулятор через інтерфейс RS-485. Регулятор формує керуюче впливання на виконавчий механізм – холодильну установку,

яка безпосередньо впливає на об'єкт управління, підтримуючи потрібну температуру холодоагенту для охолодження зернової маси.

Виходячи з цього, передатні функції мають такий вигляд:

- для датчика

$$W_D = 1 \quad (2.13)$$

- для виконавчого механізму

$$W_{BM} = \frac{-1.4694}{9.3p^2 + 7.7p + 1} \quad (2.14)$$

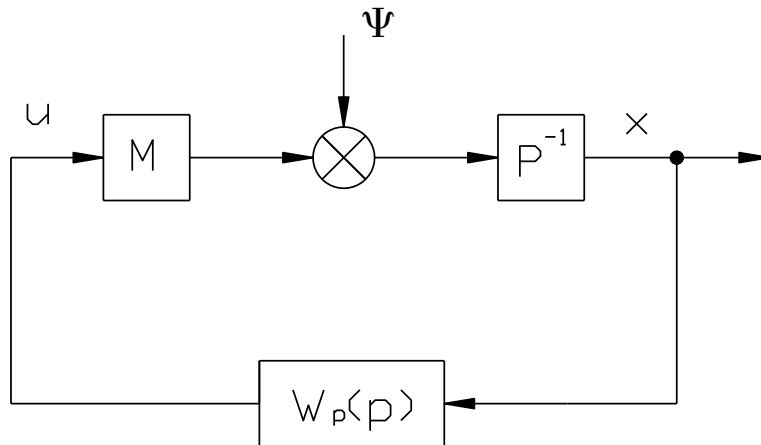
- для об'єкта управління

$$W_{Oy}(p) = \frac{1}{2p^2 + 15p + 1} \quad (2.15)$$

### 3 Розробка системи автоматичного керування

#### 3.1 Розробка системи охолодження зерна у силосі елеватора

Структурну схему САР температури зберігання зерна (підрозділ 2.6) можна подати як систему стабілізації у вигляді, показаному на рисунку 3.1.



Малюнок 3.1 – Схема структури системи стабілізації.

У цьому випадку динаміка об'єкта визначається лінійним диференціальним рівнянням із сталими коефіцієнтами.

$$P(p)x(t) = M(p)u(t) + \psi(t) \quad (3.1)$$

Тут  $x(t)$  – положення об'єкта;  $u(t)$  – вихід регулятора (керуюче вплив);  $\psi(t)$  – зовнішнє збурення, яке розглядається як стаціонарний випадковий процес із нульовим математичним очікуванням та відомою спектральною щільністю.

$$S_{\psi}(\omega) = \frac{\Gamma_1(i\omega)\Gamma_1(-i\omega)}{\Gamma_0(i\omega)\Gamma_0(-i\omega)} \quad (3.2)$$

Поліноми  $(P(p))$  та  $(M(p))$  є операторними виразами від  $(p = d/dt)$ .

Необхідно сформулювати закон керування в колі зворотного зв'язку, тобто визначити диференціальне рівняння, що встановлює зв'язок між сигналами  $(u(t))$  та  $(x(t))$ , з таким розрахунком, щоб замкнута система «об'єкт плюс регулятор» була стабільною та забезпечувала оптимальне зменшення квадратичного критерію ефективності.

$$J = r\langle x^2 \rangle + c\langle u^2 \rangle \quad (3.3)$$

де  $(r)$  і  $(c)$  — коефіцієнти вагомості, а  $\langle x^2 \rangle, \langle u^2 \rangle$  — дисперсії відповідно змінних  $x$  і  $u$ )

Потрібно визначити математичний опис регулятора, тобто вивести рівняння, яке задає його роботу.

$$W_0(p)u = \tilde{W}(p)x \quad (3.4)$$

(у вигляді операторних поліномів  $W_0(p)$  та  $\tilde{W}(p)$ ) таким чином, щоб значення функціоналу (2.3.3) було мінімальним у множині стійких замкнених систем типу «об'єкт + регулятор».

Рівняння регулятора визначається відповідно до методики Ларіна [22]. Процедуру синтезу системи стабілізації реалізуємо з використанням програмного середовища MatLab. З метою спрощення роботи в програмі замість оператора  $(p)$  застосовуватимемо оператор  $(s)$ . У результаті передаточна функція регулятора  $(W(s))$  набуде такого вигляду.

$$W(s) = \frac{-rM(-s)\Gamma_1(s)G^{-1}(-s) + P(s)\Gamma_0(s)B_-(s)}{c(s)P(-s)\Gamma_1(s)G^{-1}(-s) + M(s)\Gamma_0(s)B_-(s)}, \quad (3.5)$$

де  $B_-(s)$ ,  $G(-s)$ ,  $\Gamma_0(s)$  та  $\Gamma_1(s)$  визначаються за відповідними формульними залежностями

$$B_0(s) + B_+(s) + B_-(s) = \frac{R(s)\Gamma_1(s)}{G(-s)Q(s)\Gamma_0(s)}, \quad (3.6)$$

$$R(s) = r\beta(s)M(-s) - c(s)\alpha(s)P(-s), \quad (3.7)$$

$$G(s)G(-s) = rM(s)M(-s) + c(s)P(s)P(-s) \quad (3.8)$$

$$Q(s) = \alpha(s)M(s) + \beta(s)P(s) \quad (3.9)$$

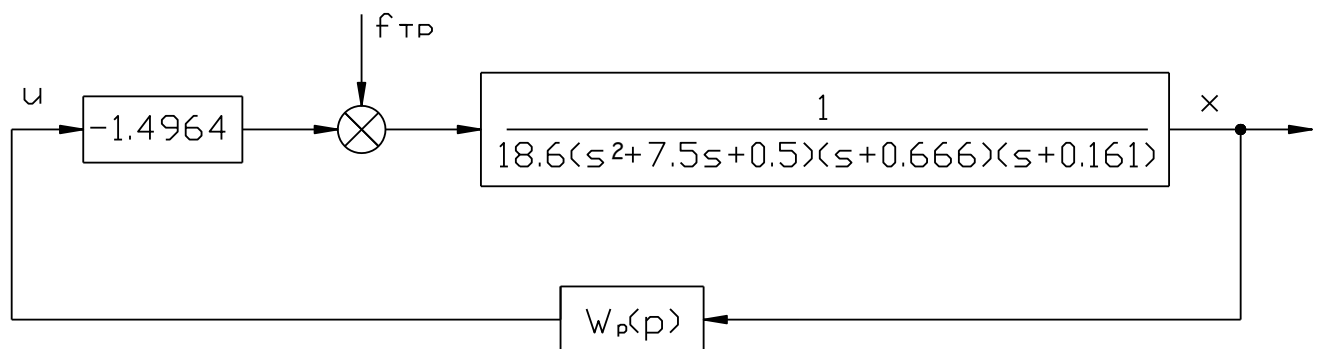
$$(3.10)$$

$\alpha(s)$  та  $\beta(s)$  – вибираються у довільний спосіб;

$\Gamma_0(s)$  та  $\Gamma_1(s)$  – поліноми, корені яких розташовані виключно в лівій півплощині комплексної площини.

Першим кроком є перетворення структурної схеми системи до вигляду, показаного на рисунку 3.1. Для цього потрібно встановити вигляд операторних поліномів  $P(s)$  і  $M(s)$ , а також задати спектральну щільність

збурювального сигналу  $S\psi(s)$ . З огляду на те, що на систему впливають випадкові перешкоди, спричинені неоднорідною структурою зернової маси, коливаннями температури та вологості повітря навколо бункера, а також роботою холодильної установки, сумарний вплив усіх цих факторів доцільно розглядати як адитивний шум. У подальшому аналізі цей шум приймається як еквівалент білого шуму. Після підстановки визначених передаточних функцій у початкову структурну схему та виконання необхідних математичних перетворень, отримаємо структуру системи, зображену на рисунку 3.2.



Зображення 3.2 – Блок-схема функціонування системи

Після проведення відповідних перетворень отримуємо:

$$P(s) = 18,6 \cdot (s + 0,666)(s + 0,161)(s^2 + 7,5s + 0,5); \quad (3.11)$$

$$M(s) = -1,4964; \quad (3.12)$$

А після проведення факторизації  $S\psi(s)$  отримуємо:

$$\Gamma_1(s) = 9,3(s + 0,666)(s + 0,161); \quad (3.13)$$

$$\Gamma_0(s) = 1. \quad (3.14)$$

Передаточну функцію  $W(s)$  регулятора будемо розраховувати для вагових коефіцієнтів функціоналу  $r = 1$ , а  $c = -K_c \cdot (s - \omega_c) \cdot (s + \omega_c)$ , причому параметри  $K_c$  та  $\omega_c$  можуть набувати значень  $K_c = [0,05; 0,1; 0,5; 1; 5; 10; 50]$ ,

$$\omega_c = [0,01, 0,02, 0,05, 0,1, 0,2, 0,5, 1]$$

Розраховуємо передаточну функцію  $W(s)$  регулятора для першого варіанту при  $r = 1$  та  $c = -0,05 \cdot (s + 0,01) \cdot (s - 0,01)$ . Усі необхідні обчислення проводимо в середовищі MatLab. Приймаємо параметри  $\alpha = 0$  та  $\beta = 1$ , після чого, користуючись формулами (3.5–3.10), отримуємо результат.

```

s=zpk('s');
alfa=0;beta=1;
r=1;c=-0.05*(s+0.01)*(s-0.01);
M=-1.4964*s^0;
M_=-1.4964*s^0;
P=18.6*(s+0.666)*(s+0.161)*(s^2+7.5*s+0.5);
P_=zpk(-ERMP(P));
g1=9.3*(s+0.666)*(s+0.161);
g0=s^0;
Q=alfa*M+beta*P

```

Zero/pole/gain:

18.6 (s+7.433) (s+0.666) (s+0.161) (s+0.06727)

R=r\*beta\*M\_-c\*alfa\*P\_

Zero/pole/gain:

-1.4964

GG\_=r\*M\*M\_+c\*P\*P\_

Zero/pole/gain:

-17.298(s+7.433)(s-7.433)(s+0.6366)(s+0.4844)(s-0.4844)(s-0.6366)(s^2-0.385s+0.157)\*(s^2+0.385s+0.157)

G\_=-sqrt(17.298)\*(s-7.433)\*(s-0.4844)\*(s-0.6366)\*(s^2-0.385\*s+0.157)

Zero/pole/gain:

-4.1591 (s-7.433) (s-0.6366) (s-0.4844) (s^2 - 0.385s + 0.157)

B=minreal(R\*g1/(G\_\*Q\*g0))

Zero/pole/gain:

0.1799

-----  
(s-7.433) (s+7.433) (s-0.6366) (s-0.4844) (s+0.06727) (s^2-0.385s+0.157)

```

[B0,B_]=SRWN(B);
[num,denum]=tfdata(B_,'v');
num1=real(num);
B_=zpk(tf(num1,denum))
Zero/pole/gain:

```

0.044745 (s-7.433) (s-0.91) (s^2 - 0.6633s + 0.3979)  
-----  
(s-7.433) (s-0.6366) (s-0.4844) (s^2 - 0.385s + 0.157)

W=minreal((-r\*M\_\*g1/G\_+P\*g0\*B\_)/(c\*P\_\*g1/G\_+M\*g0\*B\_),0.001)

Zero/pole/gain:

$$\frac{0.40021 (s+7.433) (s+0.666) (s+0.161)}{(s+0.8217) (s^2 + 0.617s + 0.2931)}$$

Таким чином, передаточну функцію регулятора визначено для випадку  $r = 1$  та  $c = -0,05 \cdot (s + 0,01) \cdot (s - 0,01)$ .

$$W_{p1}(s) = \frac{0.40021 (s + 7.434)(s + 0.666)(s + 161)}{(s + 0.4217)(s^2 + 0.617s + 0.2931)} \quad (3.15)$$

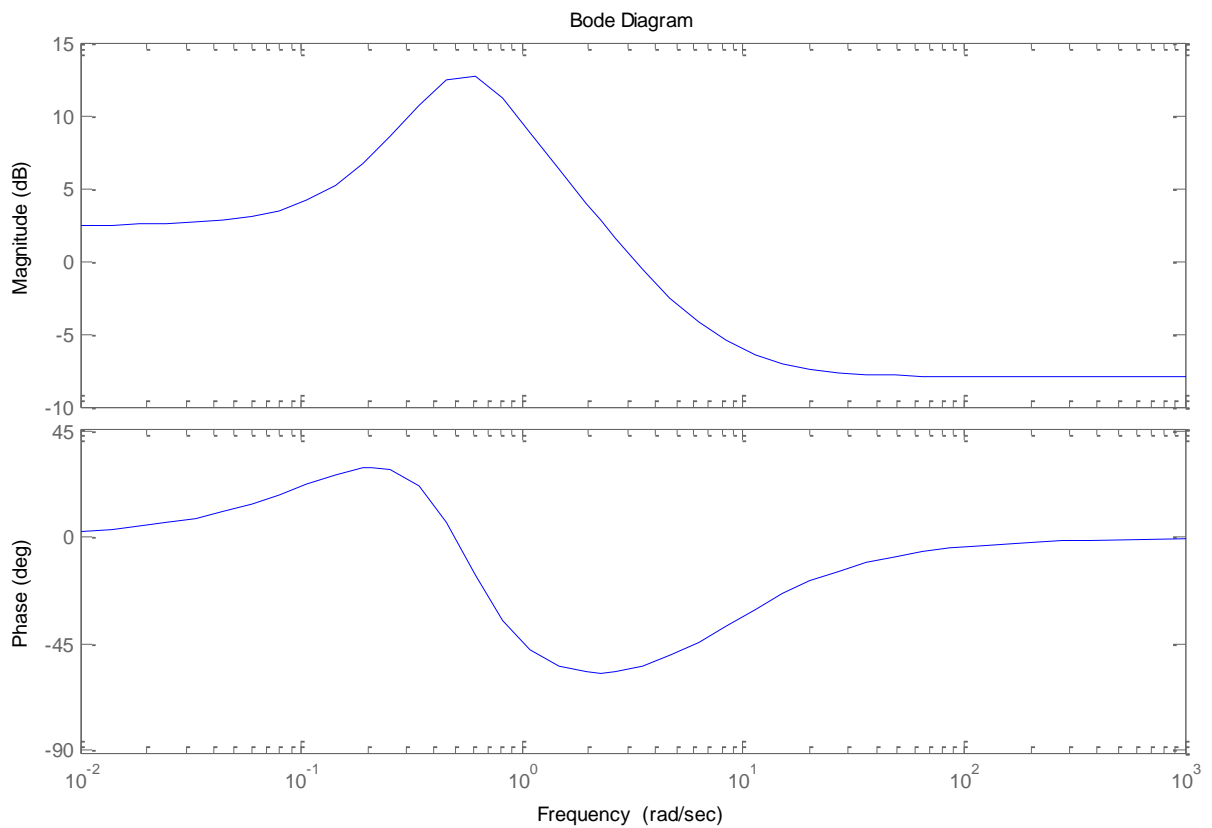


Рисунок 3.2 – ЛАЧХ та ЛФЧХ регуляторної функції (3.15)

У подібний спосіб були отримані передаточні функції для всіх комбінацій  $K_c$  та  $\omega_c$ ; підсумкові результати представлені у наведеній нижче таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Значення передаточних функцій для різних комбінацій вагових коефіцієнтів  $K_c$  та  $\omega_c$

Ваговий коефіцієнт $c$	Передаточна функція
$-0.1(s+0.01)*(s-0.01)$	$\frac{0.27112 (s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.7827)(s^2 + 0.5729 s + 0.2356)}$
$-0.1(s+0.02)*(s-0.02)$	$\frac{0.27122 (s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.7827)(s^2 + 0.5732 s + 0.2357)}$
$-0.1(s+0.05)*(s-0.05)$	$\frac{0.27109 (s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.61)}{(s + 0.7831)(s^2 + 0.5749 s + 0.2359)}$
$-0.1(s+0.1)*(s-0.1)$	$\frac{0.27059 (s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.7842)(s^2 + 0.5811 s + 0.2366)}$
$-0.1(s+0.2)*(s-0.2)$	$\frac{0.26801 (s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.7887)(s^2 + 0.6047 s + 0.2391)}$
$-0.1(s+0.5)*(s-0.5)$	$\frac{0.25551 (s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.8259)(s^2 + 0.7324 s + 0.2495)}$
$-0.1(s+1)*(s-1)$	$\frac{0.30936 (s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 1.112)(s^2 + 0.8477 s + 0.2431)}$
$-0.5(s+0.01)*(s-0.01)$	$\frac{0.10757 (s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.7192)(s^2 + 0.4768 s + 0.1375)}$
$-0.5(s+0.02)*(s-0.02)$	$\frac{0.10753 (s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.7192)(s^2 + 0.4772 s + 0.1376)}$
$-0.5(s+0.05)*(s-0.05)$	$\frac{0.10735 (s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.7194)(s^2 + 0.4797 s + 0.1379)}$
$-0.5(s+0.1)*(s-0.1)$	$\frac{0.10679 (s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.7202)(s^2 + 0.4887 s + 0.139)}$
$-0.5(s+0.2)*(s-0.2)$	$\frac{0.10459 (s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.7231)(s^2 + 0.5222 s + 0.1431)}$
$-0.5(s+0.5)*(s-0.5)$	$\frac{0.094047 (s + 7.433)(s - 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.7511)(s^2 + 0.6917 s + 0.1615)}$
$-0.5*(s+1)*(s-1)$	$\frac{0.07606 (s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 1.022)(s + 0.5965)(s + 0.2634)}$
$-1(s+0.01)*(s-0.01)$	$\frac{0.071609 (s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.7021)(s^2 + 0.4379 s + 0.1075)}$
$-1(s+0.02)*(s-0.02)$	$\frac{0.071377 (s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.7021)(s^2 + 0.4383 s + 0.1076)}$
$-1(s+0.05)*(s-0.05)$	$\frac{0.071212 (s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.7022)(s^2 + 0.4413 s + 0.108)}$

$-1(s+0.1)*(s-0.1)$	$\frac{0.070623 (s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.7028)(s^2 + 0.4518s + 0.1093)}$
$1(s+0.2)*(s-0.2)$	$\frac{0.068506 (s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.7049)(s^2 + 0.406s + 0.1141)}$
$-1(s+0.5)*(s-0.5)$	$\frac{0.059013 (s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.7272)(s^2 + 0.6805s + 0.1362)}$
$-1(s+1)*(s-1)$	$\frac{0.044628 (s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 1.013)(s + 0.6282)(s + 0.2199)}$
$5(s+0.01)*(s-0.01)$	$\frac{0.026658 (s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.6793)(s^2 + 0.3553s + 0.05901)}$
$-5(s+0.02)*(s-0.02)$	$\frac{0.026631 (s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.6793)(s^2 + 0.3559s + 0.05909)}$
$-5(s+0.05)*(s-0.05)$	$\frac{0.026459 (s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.6793)(s^2 + 0.3603s + 0.05964)}$
$-5(s+0.1)*(s-0.1)$	$\frac{0.025878 (s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.6794)(s^2 + 0.3754s + 0.06152)}$
$-5(s+0.2)*(s-0.2)$	$\frac{0.023989 (s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.68)(s^2 + 0.4284s + 0.06823)}$
$-5(s+0.5)*(s-0.5)$	$\frac{0.017564 (s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.6893)(s^2 + 0.4391s + 0.2271)}$
$-5(s+1)*(s-1)$	$\frac{0.011096 (s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 1.003)(s + 0.6572)(s + 0.1757)}$
$10(s+0.01)*(s-0.01)$	$\frac{0.017126 (s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.6743)(s^2 + 0.3241s + 0.0451)}$
$-10(s+0.02)*(s-0.02)$	$\frac{0.017097 (s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.6743)(s^2 + 0.3249s + 0.0452)}$
$-10(s+0.05)*(s-0.05)$	$\frac{0.016926 (s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.6743)(s^2 + 0.3301s + 0.04585)}$
$-10(s+0.1)*(s-0.1)$	$\frac{0.01636 (s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.6743)(s^2 + 0.3477s + 0.04809)}$
$-10(s+0.2)*(s-0.2)$	$\frac{0.014643 (s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.6745)(s^2 + 0.4078s + 0.0559)}$
$-10(s+0.5)*(s-0.5)$	$\frac{0.0097558 (s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.6799)(s^2 + 0.468s + 0.1957)}$
$-10(s+1)*(s-1)$	$\frac{0.0057795 (s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 1.002)(s + 0.6614)(s + 0.1687)}$

$-50(s+0.01)*(s-0.01)$	$\frac{0.0058095 (s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.6687)(s^2 + 0.2643 s + 0.02369)}$
$-50(s+0.02)*(s-0.02)$	$\frac{0.0057763 (s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.6686)(s^2 + 0.2655 s + 0.02385)}$
$-50(s+0.05)*(s-0.05)$	$\frac{0.0056127 (s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.6686)(s^2 + 0.2635 s + 0.02492)}$
$-50(s+0.1)*(s-0.1)$	$\frac{0.0051383 (s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.6685)(s^2 + 0.2991 s + 0.02843)}$
$-50(s+0.2)*(s-0.2)$	$\frac{0.0040474 (s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.6683)(s^2 + 0.3767 s + 0.03954)}$
$-50(s+0.5)*(s-0.5)$	$\frac{0.0021954 (s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.6694)(s + 0.4929)(s + 0.186)}$
$-50(s+1)*(s-1)$	$\frac{0.0011995 (s + 7.433)(s + 0.161)}{(s + 1)(s + 0.1626)}$

### 3.2 Оцінка ефективності розв'язання задачі регулювання

Ефективність роботи системи автоматичного регулювання визначається за величиною квадратичного функціоналу (3.3).

$$J = r\langle x^2 \rangle + c\langle u^2 \rangle,$$

де  $r$  та  $c$  – Вагові коефіцієнти,  $\langle x^2 \rangle, \langle u^2 \rangle$  - Розсіювання величин  $x$  та  $u$

Потрібно встановити такі значення вагових коефіцієнтів  $r$  та  $c$ , при яких квадратичний функціонал набуває мінімального значення.

З використанням формул (3.1–3.4) можна визначити передаточні функції, що описують взаємозв'язок між координатами системи та дією зовнішніх збурень.

$$\left. \begin{aligned} x(s) &= F_x(s)\psi(s) = \frac{1}{P(s) - M(s)W(s)}\psi(s), \\ u(s) &= F_u(s)\psi(s) = \frac{W(s)}{P(s) - M(s)W(s)}\psi(s), \\ u(s) &= W(s)x(s) = F_u(s)F_x^{-1}(s)x(s), \end{aligned} \right\} \quad (3.16)$$

де . Оскільки замкнута система має залишатися стійкою, передаточні функції  $F_x(s)$  та  $F_u(s)$  повинні бути фізично реалізовані (тобто не мати полюсів у правій півплощині). Використавши перетворення Фур'є

(підставивши  $s = i\omega$ ), функціонал (3.3) можна представити у вигляді

$$J = \frac{1}{i} \int_{-i\infty}^{i\infty} [rF_x(s)F_x(-s)S_\psi(s) + cF_u(s)F_u(-s)S_\psi(s)]ds \quad (3.17)$$

Для визначення функціоналу по-перше необхідно знайти функції  $F_x(s)$  та  $F_u(s)$  при значеннях  $c = c = -Kc^*(s-\omega_c)*(s+\omega_c)$ , причому  $Kc$  і  $\omega_c$  можуть приймати значення  $Kc = [0.05, 0.1, 0.5, 1, 5, 10, 50]$ ,  $\omega_c = [0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1]$ . Далі в скориставшись функцією `norm` в середовищі MatLab визначити функціонал.

$$\text{norm}(F(s) \cdot \frac{\Gamma_1(s)}{\Gamma_0(s)}) = \sqrt{\frac{1}{i} \int_{-i\infty}^{i\infty} F(s)F(-s)S_\psi(s)ds} \quad (3.18)$$

$$J = r \cdot \left( \text{norm}(F_x(s) \cdot \frac{\Gamma_1(s)}{\Gamma_0(s)}) \right)^2 + c \cdot \left( \text{norm}(F_u(s) \cdot \frac{\Gamma_1(s)}{\Gamma_0(s)}) \right)^2 \quad (3.19)$$

Обчислюємо значення функціоналу для заданого значення

$$c = -0.05 * (s+0.01) * (s-0.01).$$

```
>> s=zpk('s');
>> r=1;c=-0.05*(s+0.01)*(s-0.01);
>> g1=9.3*(s+0.666)*(s+0.161);
>> g0=s^0;
>> S=g1/g0
Zero/pole/gain:
9.3 (s+0.666) (s+0.161)

M=-1.4964*s^0
P=18.6*(s+0.666)*(s+0.161)*(s^2+7.5*s+0.5);
W=minreal((-r*M_*g1/G_+P*g0*B_)/(c*P_*g1/G_+M*g0*B_),0.001)

Zero/pole/gain:
0.40021 (s+7.433) (s+0.666) (s+0.161)
-----
(s+0.8217) (s^2 + 0.617s + 0.2931)

>> Fx=1/(P-M*W)

Zero/pole/gain:

0.053763 (s+0.8217) (s^2 + 0.617s + 0.2931)
-----
(s+7.433) (s+0.666) (s+0.6366) (s+0.4843) (s+0.161) (s^2 + 0.385s +
0.157)

>> Fu=W/(P-M*W);
```

```

>> minreal(Fu)

Zero/pole/gain:
          0.021517 (s+7.433)
-----
(s+0.6366) (s+0.4843) (s+7.433) (s^2 + 0.385s + 0.157)

>> stdx=norm(Fx*S)

stdx =    0.5

>> stdu=norm(Fu*S)

stdu =    5

J=norm(r*stdx)^2+norm(c*stdu)^2

J= 0.7

```

Функціонал  $J$  дорівнює 0,7, а середньоквадратичне відхилення становит  $\sigma_x = 0.5$ ,  $\sigma_u = 5$ .

Подібні обчислення були виконані й для інших значень вагового коефіцієнта  $c$ .

Значення середньоквадратичного відхилення  $\sigma_x$  для всіх варіантів  $c$  наведені в таблиці 3.2 та ілюстровані на рисунку 3.9.

Таблиця 3.2 –  $\sigma$  Середньоквадратичне відхилення  $\sigma_x$  для різних значень  $K_c$  та  $\omega_c$  вагового коефіцієнта  $c$ .

$\omega_c \backslash K_c$	0,05	0,1	0,5	1	5	10	50
0,01	0,5	0,52	0,58	0,6	0,64	0,71	0,74
0,02	0,54	0,56	0,6	0,64	0,68	0,73	0,76
0,05	0,57	0,58	0,63	0,71	0,74	0,78	0,82
0,1	0,58	0,6	0,65	0,75	0,77	0,81	0,86
0,2	0,62	0,63	0,69	0,79	0,81	0,85	0,87
0,5	0,64	0,65	0,73	0,82	0,84	0,87	0,88
1	0,67	0,69	0,76	0,84	0,86	0,89	0,9

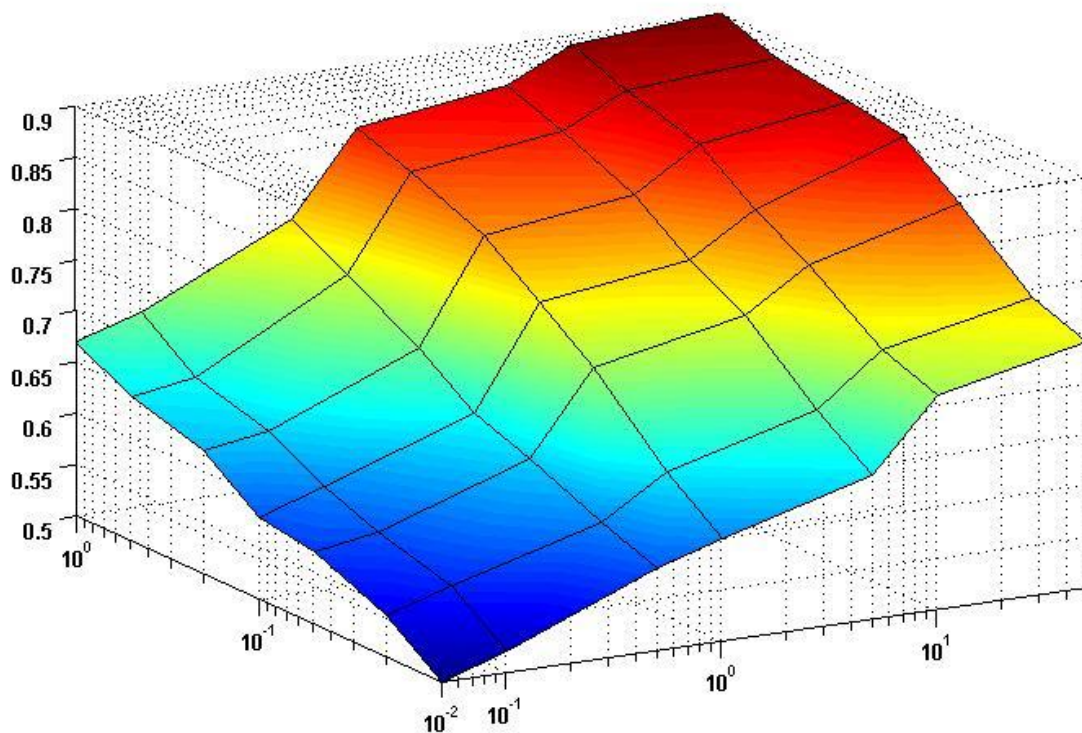


Рисунок 3.9 – Залежність середньоквадратичного відхилення  $\sigma_x$  від значень вагового коефіцієнта  $c$ .

Значення середньоквадратичного відхилення  $\sigma_u$  для всіх варіантів вагового коефіцієнта  $c$  наведені в таблиці 3.3 та відображені на рисунку 3.10.

Таблиця 3.3 – Значення  $\sigma_u$  для різних варіантів вагових коефіцієнтів  $K_c$  та  $\omega_c$  при різних значеннях коефіцієнта  $c$ .

$\omega_c \backslash K_c$	0,05	0,1	0,5	1	5	10	50
0,01	5	4,1	3,7	3,6	3,53	3,44	3,4
0,02	4,2	3,7	3,1	2,7	2,6	2,55	2,5
0,05	3,65	2,87	2,67	2,53	2,4	2,1	1,8
0,1	3,2	2,64	1,81	1,6	1,4	1,2	0,9
0,2	2,98	2,53	1,64	1,5	0,4	0,03	0,01
0,5	2,73	2,45	1,31	1,18	0,27	0,01	0,007
1	2,66	2,3	1,1	0,9	0,02	0,008	0,005

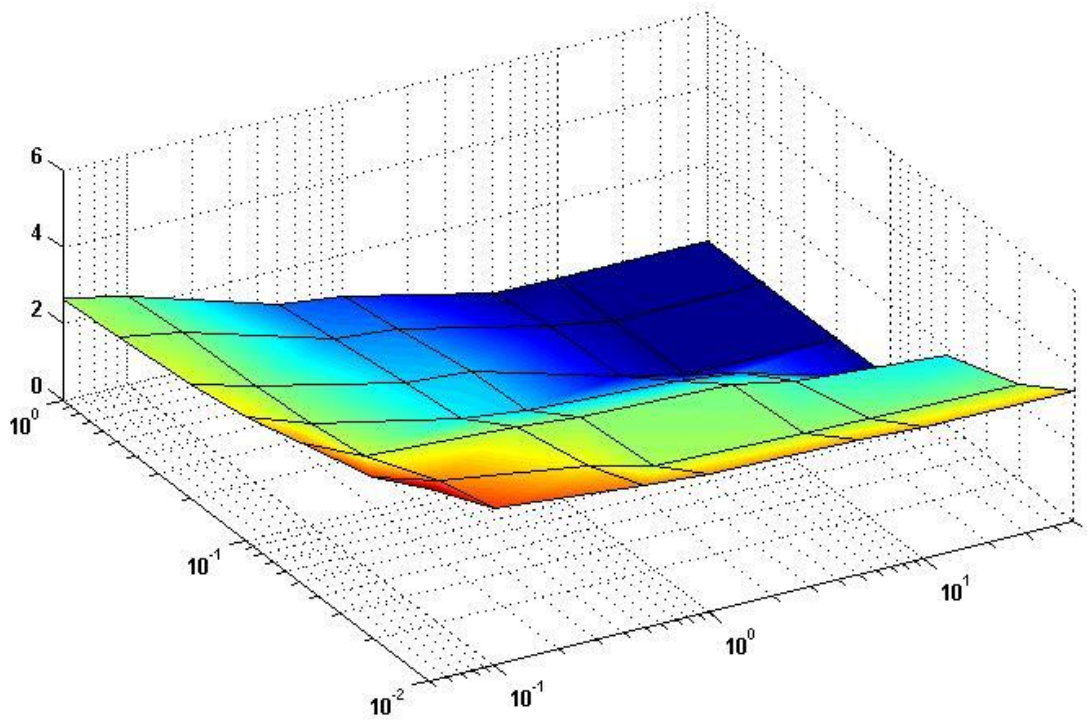


Рисунок 3.10 – Діаграма зміни  $\sigma_u$  залежно від вагового коефіцієнта  $c$ .

Таблиця 3.4 – Значення функціоналу  $J$  для різних варіацій вагового коефіцієнта  $c$ , а також рисунок 3.11 – графічне відображення залежності  $J$  від  $c$ .

Таблиця 3.4 – Значення функціоналу  $J$  для різних варіацій вагового коефіцієнта  $c$  при відповідних значеннях  $K_c$  та  $\omega_c$ .

$\omega_c \backslash K_c$	0,05	0,1	0,5	1	5	10	50
0,01	0,7	0,52	0,4	0,43	0,7	2,7	5,1
0,02	0,64	0,34	0,33	0,334	0,58	2,4	4,9
0,05	0,47	0,36	0,27	0,34	0,45	1,7	4,56
0,1	0,41	0,33	0,31	0,326	0,67	2,65	6,14
0,2	0,59	0,57	0,39	0,365	0,89	3,1	8,31
0,5	1,24	1,13	1,1	0,9	2,1	5,35	7,65
1	3,7	3,58	3,64	3,79	4,6	6,37	20

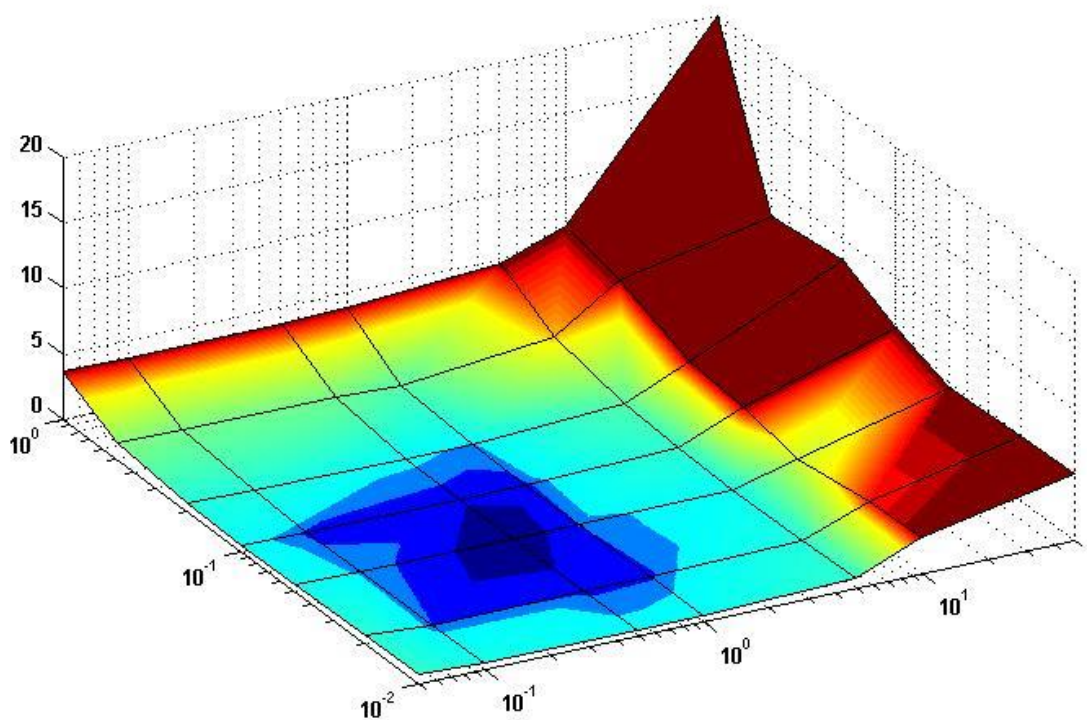


Рисунок 3.11 – Залежність значень функціоналу J від вагового коефіцієнта c.

Проаналізувавши дані таблиць 3.2–3.4 та графіки на рис. 3.9–3.11, можна зробити висновок: середньоквадратичне відхилення вихідного сигналу  $\sigma_x$  збільшується зі зростанням коефіцієнтів  $K_c$  та  $\omega_c$  вагового коефіцієнта  $c$ , тоді як середньоквадратичне відхилення управляючого сигналу  $\sigma_u$  навпаки зменшується. Мінімальне значення функціоналу якості J спостерігається при  $K_c = 0,5$  та  $\omega_c = 0,05$ , тому саме для цих параметрів обрано регулятор для практичної реалізації.

$$W_P(s) = \frac{0.10735 (s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.7194)(s^2 + 0.4797s + 0.1379)} \quad (3.20)$$

## 4 Впровадження системи автоматичного керування на практиці

### 4.1 Обґрунтування часу дискретизації

Процес перетворення неперервних сигналів у дискретні виникає через наявність у системі дискретного компонента, на виході якого формується послідовність імпульсів. Таким компонентом може слугувати ключ  $K'$ , що замикається через кожний період квантування  $T$  (рис. 4.1).

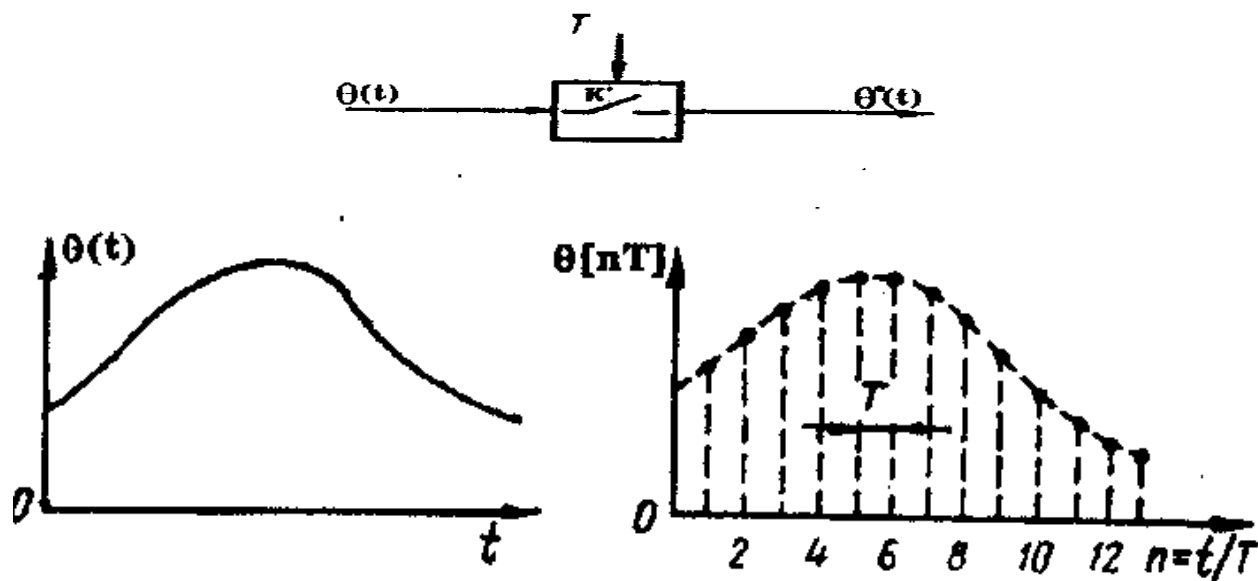


Рисунок 4.1 – Дискретний компонент системи у вигляді ключа та відповідні часові діаграми його роботи

Питання вибору оптимального періоду квантування ( $T$ ) відноситься до ключових задач ефективного використання машинного часу при реалізації систем цифрового управління. Зменшення ( $T$ ) підвищує точність керування та завантаження мікроЕОМ, проте веде до неекономного витрачання ресурсів обчислювальної системи. Збільшення ( $T$ ) погіршує якість регулювання. Тому постає необхідність знайти компромісне рішення, яке б задовольняло ці протилежні вимоги. Вибір ( $T$ ) здійснюється на основі спектральних властивостей неперервної функції та керується теоремою Котельникова.

Теорема Котельникова стверджує, що якщо функція часу  $\Theta(t)$  не містить гармонік із частотами, вищими за  $\omega_{\max}$ , то її значення в моменти часу  $nT$ , розташовані через рівні інтервали  $T$

$$T = \frac{\pi}{\omega_{\max}} \quad (4.1)$$

повністю визначають цю функцію. Іншими словами, частота квантування  $\omega \geq \omega_{\max}$  повинна задовольняти умову  $\omega \geq \omega_{\max}$ . За таких умов дискретна решітчаста функція точно відтворює неперервну функцію

$$\Theta(t) = \Theta \left[ n \cdot \frac{\pi}{\omega_{\max}} \right] \quad (4.2)$$

при квантуванні інформація не втрачається.

Максимальну частоту  $\omega_{\max}$  у спектрі вихідного сигналу  $\beta(j\omega)$  замкненого контуру цифрового керування визначають за амплітудно-частотною характеристикою, використовуючи критерій Джурі. Якщо на вхід регулятора подати гармонічний одиничний сигнал  $\alpha(t) = \sin \omega t$ , то вихідний сигнал замкненого контуру можна представити у вигляді функції від часу:

$$\beta(j\omega) = \frac{W_p(j\omega) \cdot W_o(j\omega)}{1 + W_p(j\omega) \cdot W_o(j\omega)} \quad (4.3)$$

З цього випливає, що можна встановити таку частоту  $\omega_{\max}$ , при якій амплітуда  $|\beta(j\omega)|$  буде незначною, адже замкнута система пригнічує високочастотні складові сигналу. Саме це значення  $\Theta_{om}$  визначає необхідну точність, яку слід забезпечити на виході системи.

На основі отриманих вихідних даних визначаємо оптимальне значення періоду квантування сигналів у цифровій системі.

Частотна передаточна функція об'єкта управління задається наступним рівнянням

$$W_o(p) = \frac{-1,5}{(2 \cdot p^2 + 15 \cdot p + 1)(1,5 \cdot p + 1)(6,21 \cdot p + 1)} \quad (4.4)$$

Частотна передаточна функція регулятора визначається наступним рівнянням

$$W_p(p) = \frac{0,86(0,135 \cdot p + 1)(1,5 \cdot p + 1)(6,21 \cdot p + 1)}{(7,25 \cdot p^2 + 3,48 \cdot p + 1)(1,39 \cdot p + 1)} \quad (4.5)$$

У цьому випадку необхідно забезпечити задану точність керування об'єктом у стаціонарному режимі  $\Theta_{om} = 0.1$

Частотна передаточна функція замкнутої системи визначається наступним виразом:

$$\beta(j\omega) = \frac{W_p(j\omega) \cdot W_o(j\omega)}{1 + W_p(j\omega) \cdot W_o(j\omega)} = \Theta \quad (4.6)$$

Внаслідок підстановки виразів (4.4) та (4.5) у рівняння (4.6) отримуємо:

$$\frac{4,45(0,135 \cdot j\omega + 1)}{(5,4 \cdot (j\omega)^2 + 2,84 \cdot j\omega + 1)(1,32 \cdot j\omega + 1)(0,134 \cdot j\omega + 1)(72,2 \cdot j\omega + 1)} = 0,1 \quad (4.7)$$

Розв'язавши це рівняння, визначаємо значення частоти  $\omega_{max} = 1,76$

Визначення оптимального розрахункового періоду квантування сигналів

$$T_{роз} = \frac{\pi}{\omega_{max}} = \frac{\pi}{1,76} = 1,79$$

У результаті  $T < T_{роз}$   $T = 0.1c$

Ми обираємо саме цей період дискретизації, оскільки пріоритетом є досягнення максимальної точності роботи системи.

## 4.2 Обчислення Z-перетворення передаточної функції регулятора

Для впровадження мікропроцесорної системи керування потрібно здійснити Z-перетворення передаточної функції регулятора, яка була отримана

в результаті синтезу в підрозділі 3.1.

$$W_p(s) = \frac{0.10735 (s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.7194)(s^2 + 0.4797 s + 0.1379)}. \quad (4.8)$$

Здійснимо розклад передаточної функції регулятора на суму найпростіших дробів:

$$W_p(s) = 0.1074 + \frac{0.06925}{s + 0.7194} + \frac{0.6887 s + 0.09085}{s^2 + 0.4797 s + 0.1379}. \quad (4.9)$$

Далі проведемо Z-перетворення із використанням програмного середовища MatLab, прийнявши період дискретизації  $T_0 = 0.001$  с.

$$W_p(z) = 0.1074 + \frac{6.922 \cdot 10^{-5}}{z - 0.9993} + \frac{0.0006886 z - 0.0006885}{z^2 - 2 z + 0.9995}. \quad (4.10)$$

$$W_p(z) = 0.1074 + \frac{6.922 \cdot 10^{-5} \cdot z^{-1}}{1 - 0.9993 z^{-1}} + \frac{0.0006886 z^{-1} - 0.0006885 z^{-2}}{1 - 2 z^{-1} + 0.9995 z^{-2}} \quad (4.11)$$

На основі отриманої дискретної передаточної функції регулятора формуємо відповідні різницеві рівняння:

$$u[n] = u_1[n] + u_2[n] + u_3[n];$$

$$u_1[n] = 0.1074x[n];$$

$$u_2[n] = 6.922 \cdot 10^{-5}[n-1] - 0.9993u_2[n-1];$$

$$u_3[n] = 0.0006886x[n-1] - 0.00068853x[n-2] - 2u_3[n-1] - 0.99956u_3[n-2].$$

Блок-схема програмної реалізації наведена на рисунку 4.2, при цьому значення коефіцієнтів мають такі величини:

$$a = 0.1074; b_1 = 6.922 \cdot 10^{-5}; b_2 = 0.9993;$$

$$d_1 = 0.0006886; d_2 = -0.00068853; e_1 = 2; e_2 = 0.99956.$$

На основі отриманої схеми програмної реалізації слід здійснити побудову регулятора, реалізувавши його функціонування за допомогою мікропроцесорного пристрою.

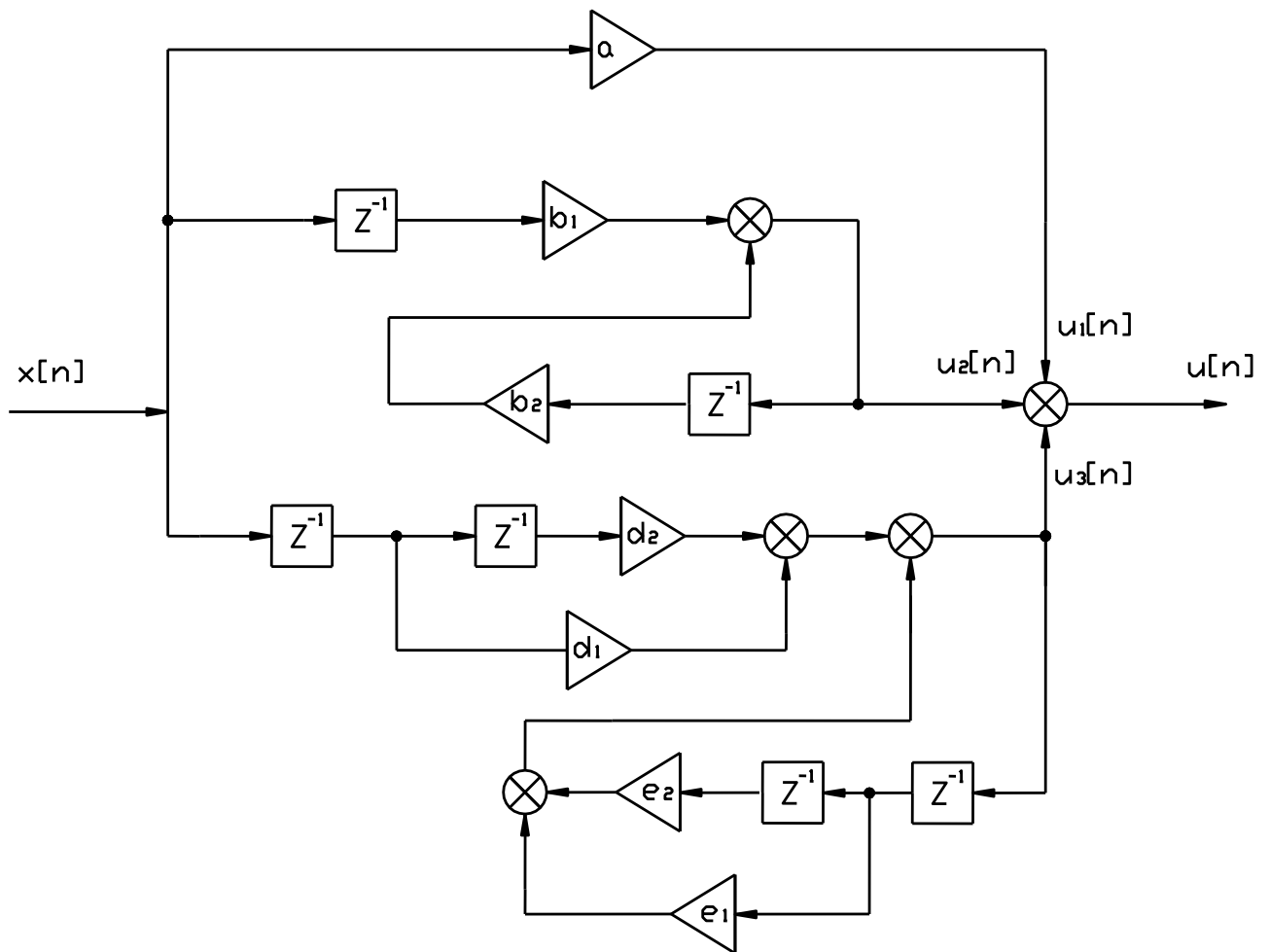


Рисунок 4.2 – Структурна схема програмної реалізації регулятора

### 4.3 Опис електричної принципової схеми регулятора

Цифровий регулятор реалізується на базі однокристалльної мікроЕОМ AVR AT90S8515. Даний мікроконтролер характеризується поєднанням високої швидкодії, RISC-архітектури та низького енергоспоживання, що робить його доцільним для застосування в системах автоматичного керування.

AT90S8515 належить до 8-розрядних AVR®-мікроконтролерів і оснащений 8 Кбайт Flash-пам'яті, яка підтримує внутрішньосистемне програмування. Завдяки цьому завантаження та оновлення програмного забезпечення може здійснюватися без демонтажу мікросхеми з плати.

До основних функціональних можливостей мікроконтролера належать:

- високопродуктивна AVR® RISC-архітектура з мінімальним споживанням енергії;

- 118 команд, більшість з яких виконуються за один такт;
- 8 Кбайт Flash-пам'яті з ресурсом до 1000 циклів запису/стирання та підтримкою SPI-інтерфейсу для програмування;
- 512 байт EEPROM з підвищеним ресурсом (до 100 000 циклів запису/стирання);
- 512 байт внутрішньої оперативної пам'яті SRAM;
- 32 регістри загального призначення розрядністю 8 біт;
- 32 програмовані лінії введення/виведення;
- апаратний UART для послідовного обміну даними;
- SPI-інтерфейс для швидкісної синхронної передачі інформації.

Мікроконтролер підтримує роботу в діапазоні напруг живлення від 2,7 до 6,0 В і може функціонувати на тактових частотах до 8 МГц. При цьому його продуктивність сягає 8 MIPS при частоті 8 МГц, що дозволяє ефективно реалізовувати алгоритми цифрового регулювання.

До складу AT90S8515 входять:

- один 8-розрядний таймер/лічильник з окремим дільником частоти;
- один 16-розрядний таймер/лічильник з режимами захоплення та порівняння;
- модуль зведеного широтно-імпульсного керування (ШІМ);
- зовнішні та внутрішні джерела переривань;
- програмний сторожовий таймер з власним генератором тактових імпульсів;
- вбудований аналоговий компаратор.

Для зменшення енергоспоживання передбачені спеціальні режими роботи, зокрема режим очікування (Idle) та режим глибокого сну (Power Down). Крім того, мікроконтролер має апаратні засоби захисту програмного коду від несанкціонованого доступу.

Таким чином, AT90S8515 є 8-розрядним CMOS-мікроконтролером із низьким споживанням енергії та високою обчислювальною ефективністю.

Завдяки виконанню більшості інструкцій за один такт він забезпечує продуктивність, близьку до 1 MIPS на кожен МГц тактової частоти, що дозволяє гнучко узгоджувати швидкодію системи з вимогами до енергоспоживання.

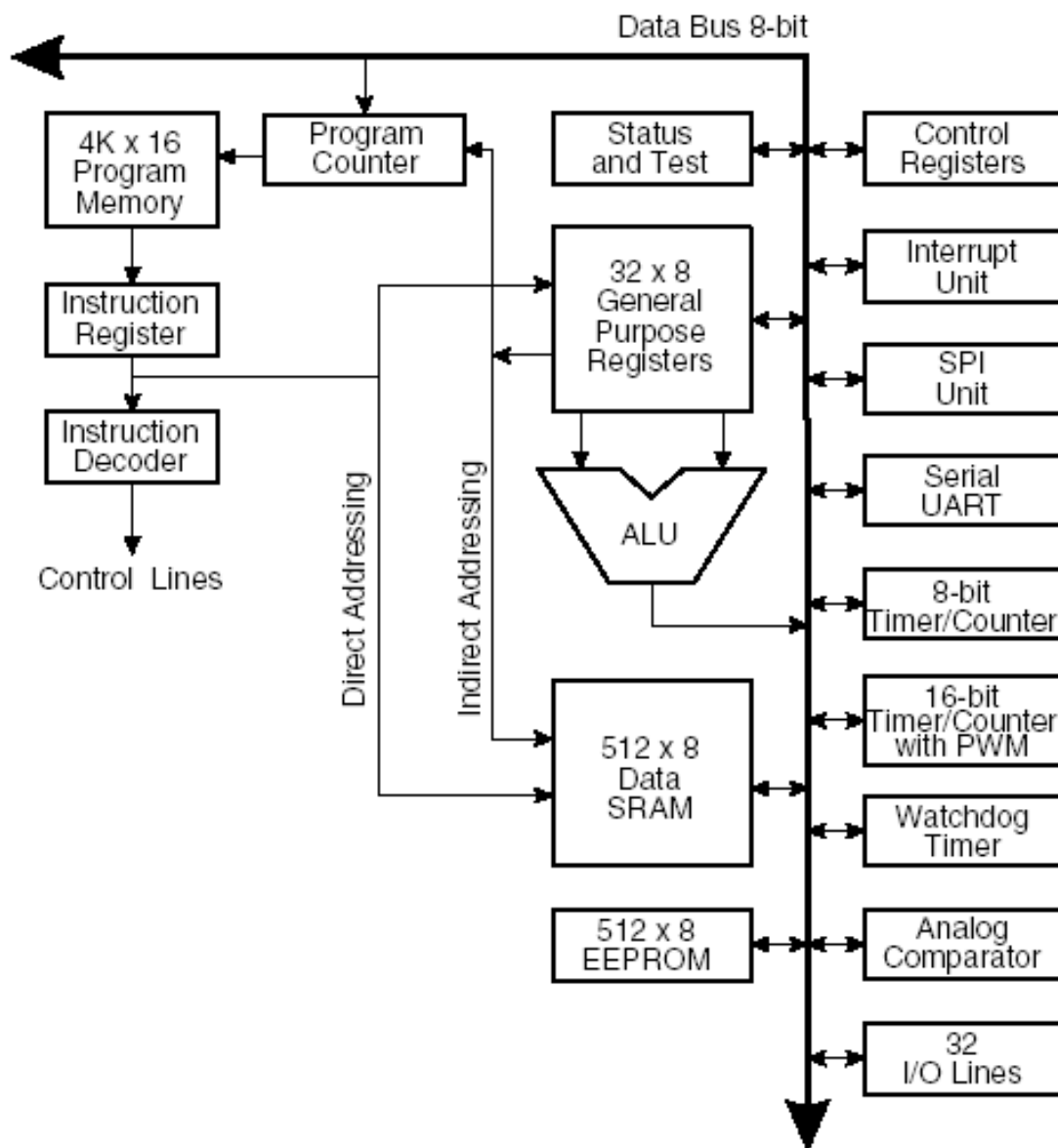


Рисунок 4.3 – Функціональна блок-схема мікроконтролера AT90S8515

Ядро AVR оснащено потужним набором команд та 32 робочими регістрами загального призначення. Всі ці 32 регістри безпосередньо підключені до арифметико-логічного пристрою (АЛП), що дозволяє

одночасно звертатися до двох незалежних регістрів під час виконання однієї інструкції за один такт. Завдяки цьому архітектура забезпечує значно вищу ефективність коду та пропускну здатність, що може бути до 10 разів більшою у порівнянні зі стандартними мікроконтролерами на основі CISC.

Мікроконтролер AT90S8515 оснащений 8 Кбайт Flash-пам'яті з можливістю внутрішнього програмування, 512 байт EEPROM, 512 байт SRAM, 32 універсальні лінії вводу/виводу, 32 регістри загального призначення, а також універсальні таймери/лічильники з режимами порівняння. Крім того, він підтримує внутрішні та зовнішні переривання, програмований UART, слідкувальний таймер із вбудованим тактовим генератором та послідовний SPI-порт. Для зниження енергоспоживання передбачено два програмовані режими: «Idle Mode», який зупиняє CPU, але залишає активними SRAM, таймери/лічильники, SPI та систему переривань; і «Power Down», що повністю зупиняє тактовий генератор та всі функції мікроконтролера, зберігаючи стан регістрів до наступного зовнішнього переривання або апаратної ініціалізації.

Пристрій створений із використанням високощільної енергонезалежної пам'яті, розробленої компанією Atmel. Вбудована Flash-пам'ять із можливістю внутрішнього програмування дозволяє перепрошивати програмний код безпосередньо в системі через SPI-інтерфейс або за допомогою стандартного програматора. Поєднання вдосконаленого 8-ми розрядного RISC-CPU та Flash-пам'яті на одному кристалі забезпечує високу продуктивність мікроконтролера AT90S8515, роблячи його гнучким і економічно ефективним рішенням для широкого спектра систем управління.

Мікроконтролер AVR AT90S8515 сумісний із повним спектром розробницьких інструментів і програмних пакетів, включаючи компілятори мови C, макроасемблери, програмні відладчики та симулятори, внутрішньосхемні емулятори, а також комплекти для створення прототипів.

Для зчитування даних із датчиків застосовується паралельний інтерфейс RS-485 на базі мікросхеми MAX1481 від компанії MAXIM. Для

обслуговування трьох термопідвісок використовуються три окремі мікросхеми інтерфейсу, позначені як DD1–DD3.

Інтерфейс RS-485, також відомий як EIA/TIA-485, є одним із найбільш розповсюджених стандартів фізичного рівня передачі даних. Фізичний рівень визначає канал зв'язку та метод передачі сигналів і відповідає першому рівню моделі взаємодії відкритих систем OSI.

Мережа, що використовує інтерфейс RS-485, складається з приймачів і передавачів, з'єднаних витю парою проводів. Принцип роботи RS-485 базується на диференційному (балансному) способі передачі даних: один сигнал передається одночасно по двох дротах у вигляді оригіналу та його інверсної копії. Тобто, коли на проводі А присутня "1", на проводі В — "0", і навпаки. Завдяки цьому між дротами завжди існує різниця потенціалів: при "1" вона позитивна, а при "0" — негативна.

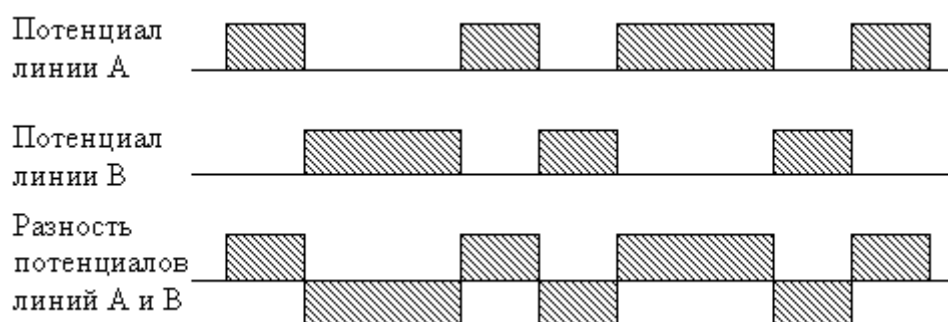


Рисунок 4.4 - Принцип диференціальної передачі даних

Сигнал передається саме завдяки цій різниці потенціалів. Такий метод передачі робить систему стійкою до синфазних перешкод — коли однакова за величиною дія впливає на обидва дроти лінії. Наприклад, електромагнітна хвиля, проходячи поруч із лінією, наводить однаковий потенціал на обидва дроти. У системах типу RS-232, де сигнал вимірюється відносно загальної землі, наведений потенціал може спотворити сигнал, а падіння потенціалу на довгому загальному проводі створює додатковий шум. У диференціальній схемі таких спотворень не виникає: два дроти, розташовані поруч і перекручені, одночасно отримують однакове наведення, і різниця потенціалів,

що несе корисну інформацію, залишається незмінною.

Апаратна реалізація інтерфейсу включає використання мікросхем-приймопередавачів із диференціальними входами та виходами для підключення до лінії й цифровими портами для з'єднання з UART контролера. Існують два основні варіанти такого інтерфейсу: RS-422 та RS-485.

RS-422 є повнодуплексним інтерфейсом, де передача та прийом сигналів здійснюються по двох окремих парах проводів, причому на кожній парі допускається лише один передавач.

RS-485, навпаки, працює в напівдуплексному режимі: передача та прийом відбуваються по одній парі проводів із часовим поділом. У такій мережі можливе підключення кількох передавачів, оскільки вони можуть відключатися під час прийому сигналу.

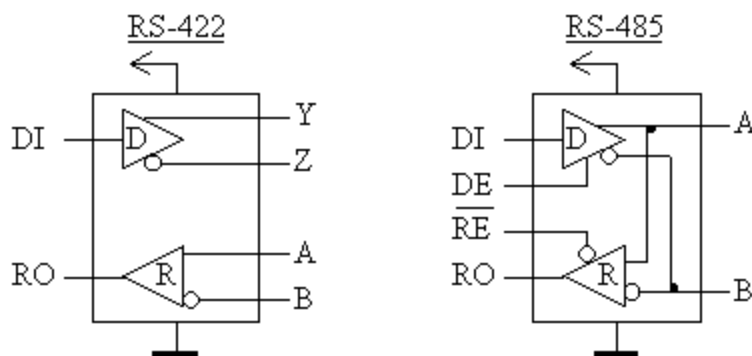


Рисунок 4.5 – Схематичне зображення апаратної реалізації інтерфейсу.

D (driver) – блок передачі сигналу;

R (receiver) – блок прийому сигналу;

DI (driver input) – цифровий вхід для передавача;

RO (receiver output) – цифровий вихід приймача;

DE (driver enable) – сигнал дозволу роботи передавального модуля;

RE (receiver enable) – сигнал дозволу роботи приймального модуля;

A – прямий диференціальний канал вхід/вихід;

B – інверсний диференціальний канал вхід/вихід;

Y – прямий диференціальний вихід (для RS-422);

Z – інверсний диференціальний вихід (для RS-422).

Зосередимося на роботі прийомопередавача RS-485. Цифровий вихід

приймача (RO) підключають до UART-порту прийому (RX), а цифровий вхід передавача (DI) — до UART-порту передачі (TX). Оскільки диференціальна лінія спільна для обох пристроїв, під час прийому передавач потрібно відключати, а під час передачі — приймач. Для цього використовуються керуючі входи: дозвіл приймача (RE) та дозвіл передавача (DE). Вхід RE є інверсним, тому його можна об'єднати з DE, що дозволяє керувати перемиканням між приймачем і передавачем одним сигналом з порту контролера. При рівні логічного «0» модуль працює на прийом, а при «1» — на передачу.

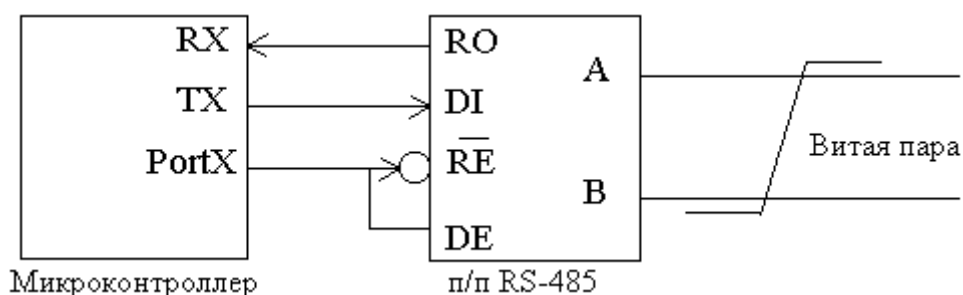


Рисунок 4.6 – Схема підключення інтерфейсу RS-485 до мікроконтролера.

Приймач, отримуючи на своїх диференціальних входах (AB) різницю потенціалів ( $U_{AB}$ ), перетворює її на цифровий сигнал на виході RO. Чутливість приймача може відрізнятися залежно від моделі, але виробники завжди вказують у технічній документації гарантований діапазон сприйняття сигналу. Зазвичай ці пороги складають  $\pm 200$  мВ: якщо ( $U_{AB} > +200$ ) мВ, приймач фіксує логічну "1", якщо ( $U_{AB} < -200$ ) мВ — логічну "0". Якщо різниця потенціалів не досягає цих меж, правильне визначення сигналу не гарантується. Крім того, у лінії можуть виникати високочастотні або несинфазні перешкоди, які додатково спотворюють слабкий сигнал.

Всі пристрої підключаються до однієї крученої пари однаково: прямі виходи (A) до одного проведення, інверсні (B) - до іншого.

Вхідний опір приймача на лінійній стороні ( $R_{AB}$ ) зазвичай дорівнює близько 12 кОм. Оскільки потужність передавача обмежена, це накладає ліміт на кількість приймачів, які можна підключити до однієї лінії. Згідно зі

стандартом RS-485 і з урахуванням узгоджувальних резисторів, типовий передавач може обслуговувати до 32 приймачів. Проте існують мікросхеми з підвищеним вхідним опором, що дозволяє значно збільшити кількість підключених пристроїв понад 32.

Згідно зі стандартом RS-485, максимально допустима швидкість передачі даних може сягати 10 Мбод/с, а максимальна довжина лінії — 1200 м. Якщо потрібно забезпечити комунікацію на відстань, що перевищує 1200 м, або підключити більше пристроїв, ніж дозволяє навантажувальна здатність передавача, використовують спеціальні повторювачі (репітери) для підсилення та ретрансляції сигналу.

Паралельний інтерфейс RS-485 застосовується також для зв'язку мікроконтролера з холодильною установкою, забезпечуючи передачу команд керування та прийом даних про стан установки.

Для управління вентилятором через мікроконтролер застосовується схема вмикання та вимикання двигуна, яка побудована на основі транзисторного ключа та оптодіода.

Для контролю температури в силосі на різних рівнях застосовується чотиризначний восьмисегментний індикатор, а для вибору потрібного рівня використовується клавіатура 3×4. Оскільки система реагує повільно, обраний період дискретизації  $T_0 = 0,001$  с повністю відповідає необхідним вимогам.

#### **4.4 Аналіз впливу вологості на тепловий стан зернової маси**

Згідно з розділом 1.2, оптимальна вологість для тривалого зберігання зерна не повинна перевищувати 14%. Якщо вологість зростає до 18%, температура зерна починає різко підвищуватися на 7–9 °С. Мета цього дослідження полягає в моделюванні процесу охолодження зерна при раптовому збільшенні вологості до 18%, з оцінкою того, наскільки ефективно обраний регулятор і виконавчий механізм зможуть знизити температуру за умов підвищеної вологості.

Для цього моделювання застосовується середовище Matlab Simulink, де

будується структурна схема досліджуваної системи:

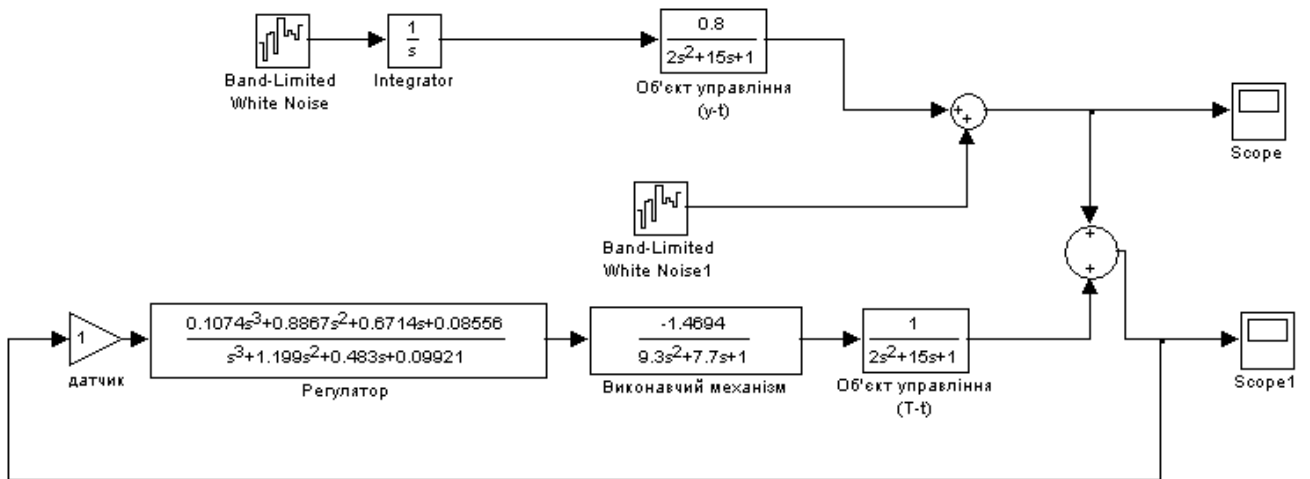


Рисунок 4.7 – Структурна модель системи для проведення дослідження

У цю структурну модель були інтегровані передатні функції:

- датчика

$$W_D = 1$$

- регулятора

$$W_P = \frac{0.10735(p + 7.433)(p + 0.666)(p + 0.161)}{(p + 0.7194)(p^2 + 0.4797p + 0.1379)}$$

- виконавчого пристрою (механізму)

$$W_{BM} = \frac{-1.4694}{9.3p^2 + 7.7p + 1};$$

- об'єкта керування, що описує зміну температури зерна залежно від температури повітря, яке подається у силос

$$W_{Oy1}(p) = \frac{1}{2p^2 + 15p + 1}$$

- об'єкта керування, що відображає зміну температури зернової маси залежно від рівня вологості

$$W_{Oy2}(p) = \frac{0.08}{2p^2 + 15p + 1}$$

В схемі вологість, що негативно впливає на зернову масу, змодельована як інтегрований білий шум.

У процесі моделювання отримано графіки зміни температури у часі: без втручання регулятора (рис. 4.8) та з урахуванням дії системи автоматичного регулювання (рис. 4.9).

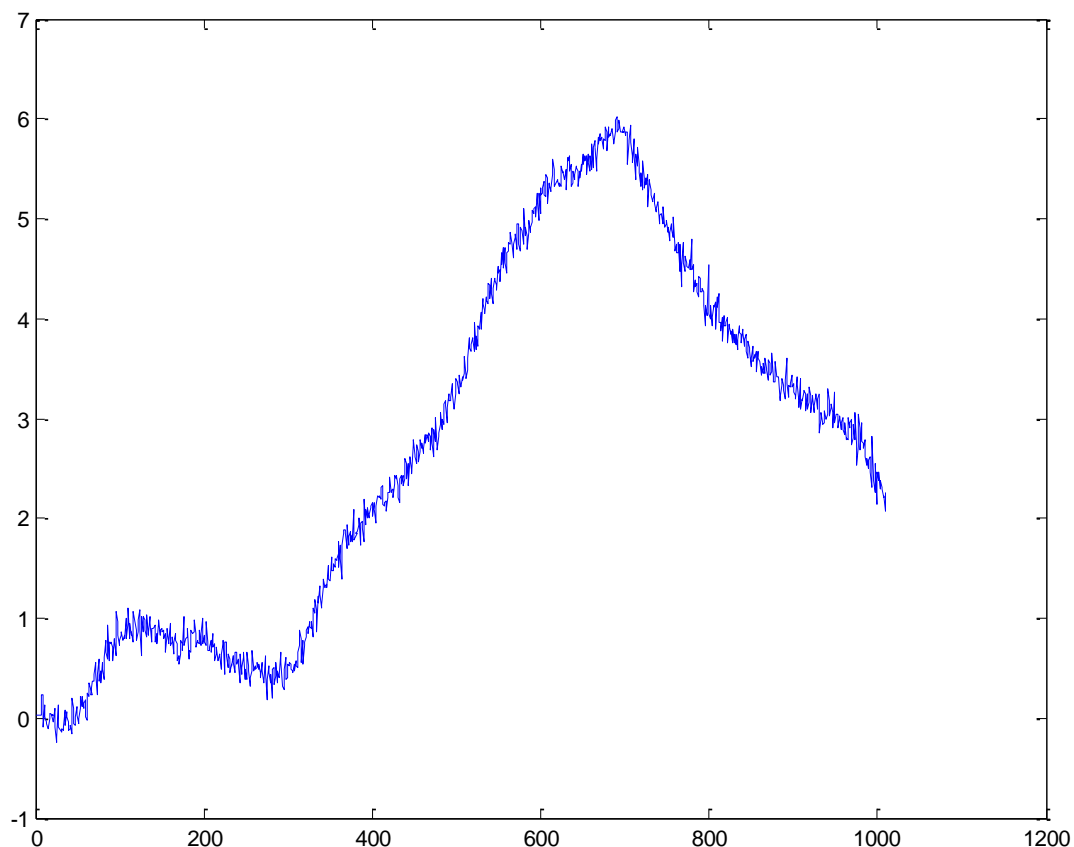


Рисунок 4.8 – Залежність температури зернової маси від вологості без впливу системи регулювання

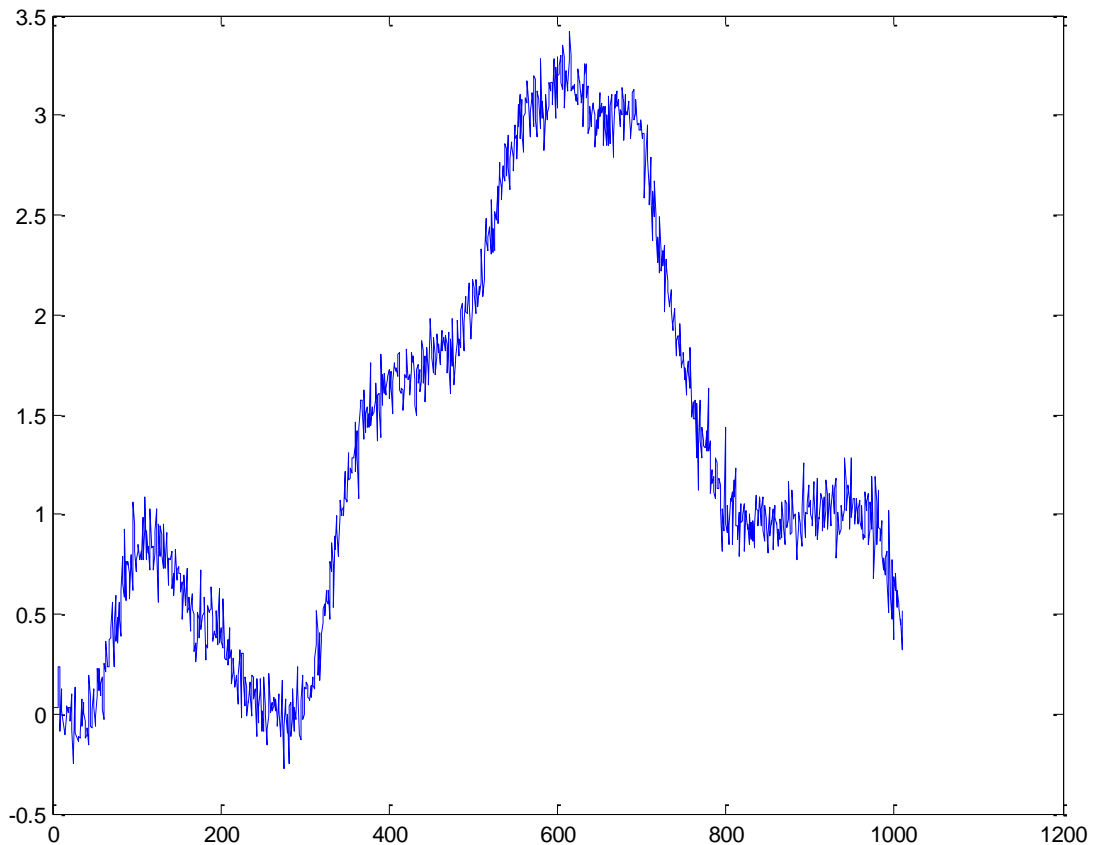


Рисунок 4.9 – Динаміка температури зернової маси при підвищенні вологості під впливом системи автоматичного регулювання

У наступному етапі дослідження ми варіюємо інтенсивність білого шуму, тобто змінюємо ступінь впливу вологості на температуру зернової маси. Після цього будемо відповідні графіки та аналізуємо, як система автоматичного регулювання реагує на ці умови, наскільки ефективно вона підтримує температуру в заданих межах та як швидко здатна реагувати на відносно різкі коливання температури.

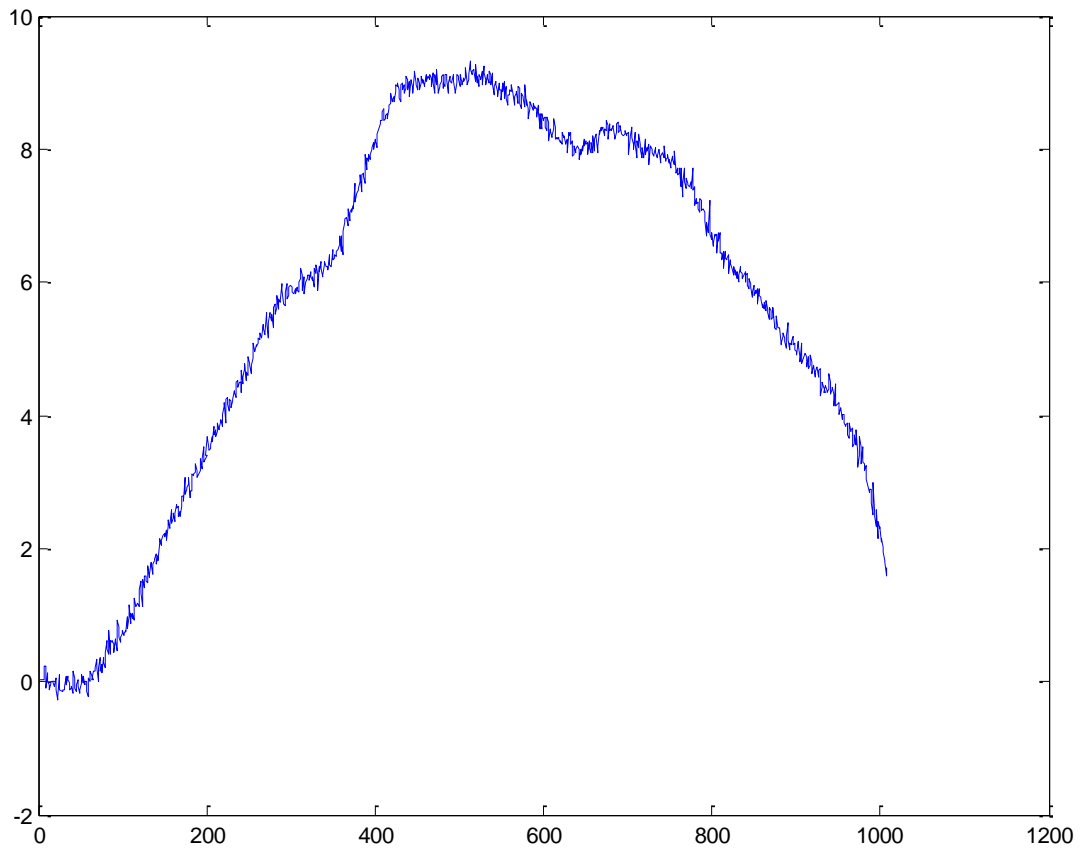


Рисунок 4.10 – Залежність температури зернової маси від вологості

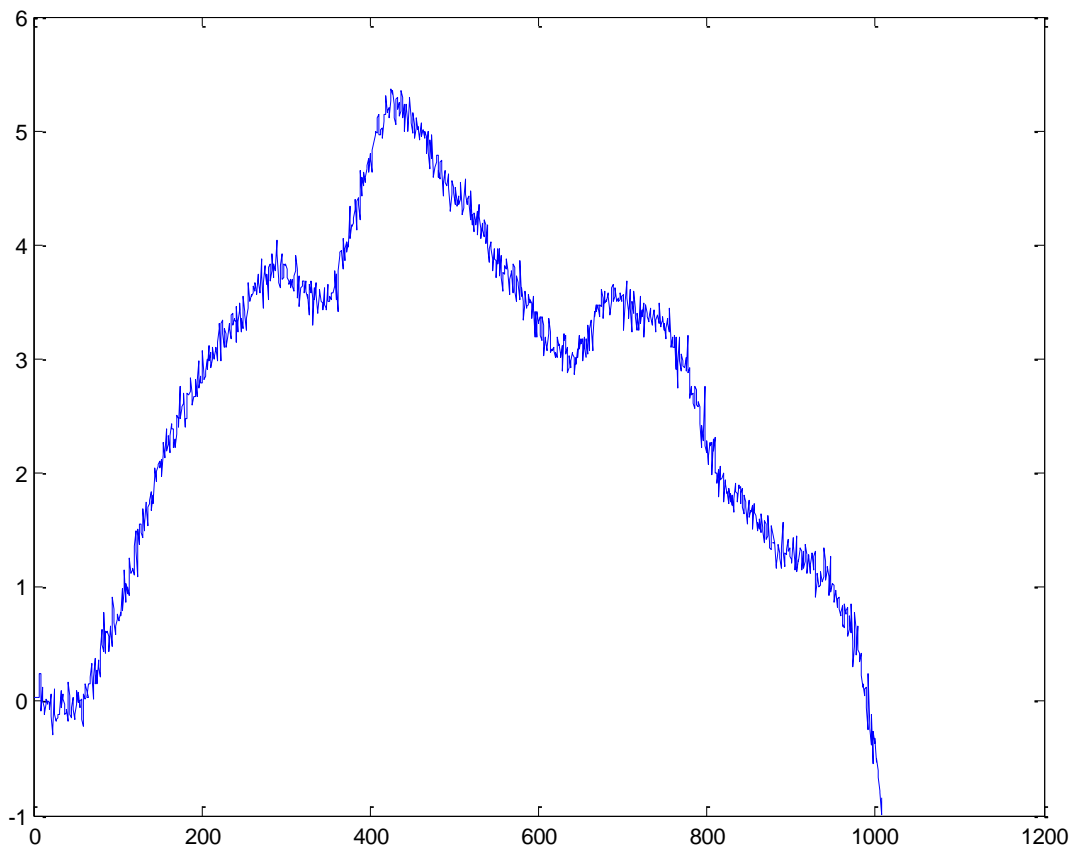


Рисунок 4.11 – Коливання температури зернової маси при підвищенні вологості під впливом системи автоматичного регулювання

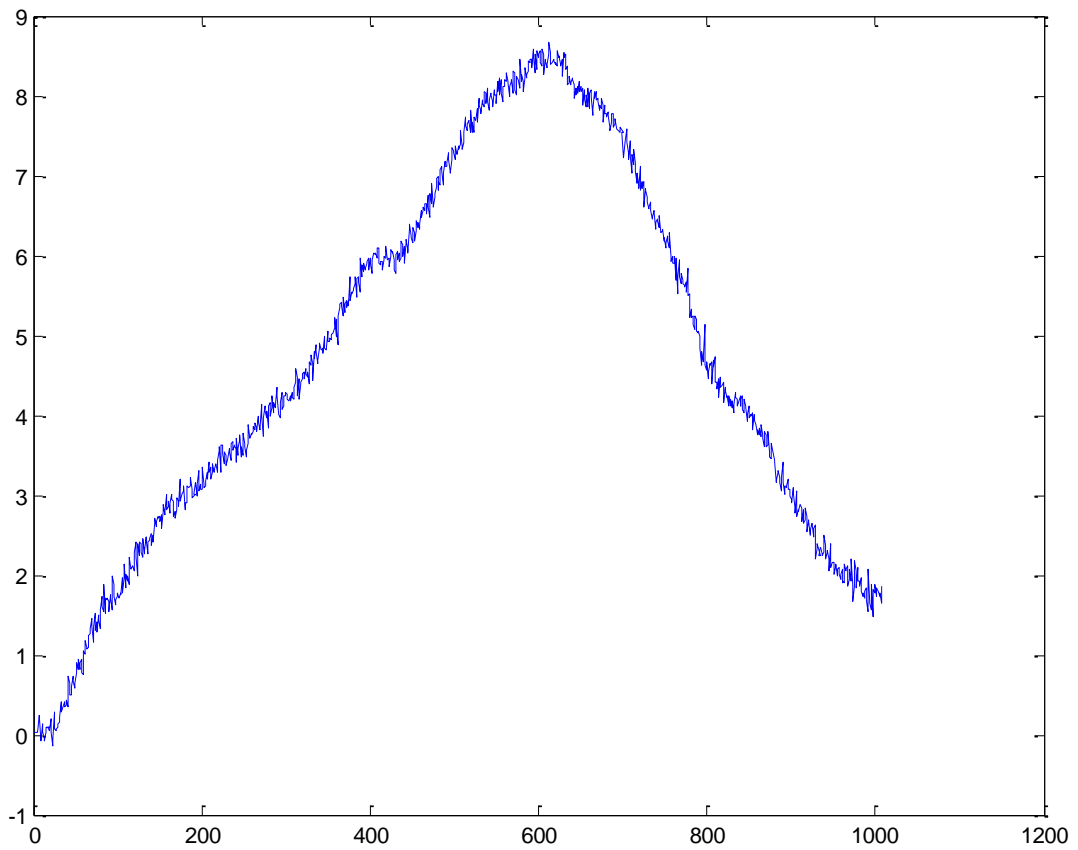


Рисунок 4.12 – Залежність температури зернової маси від вологості

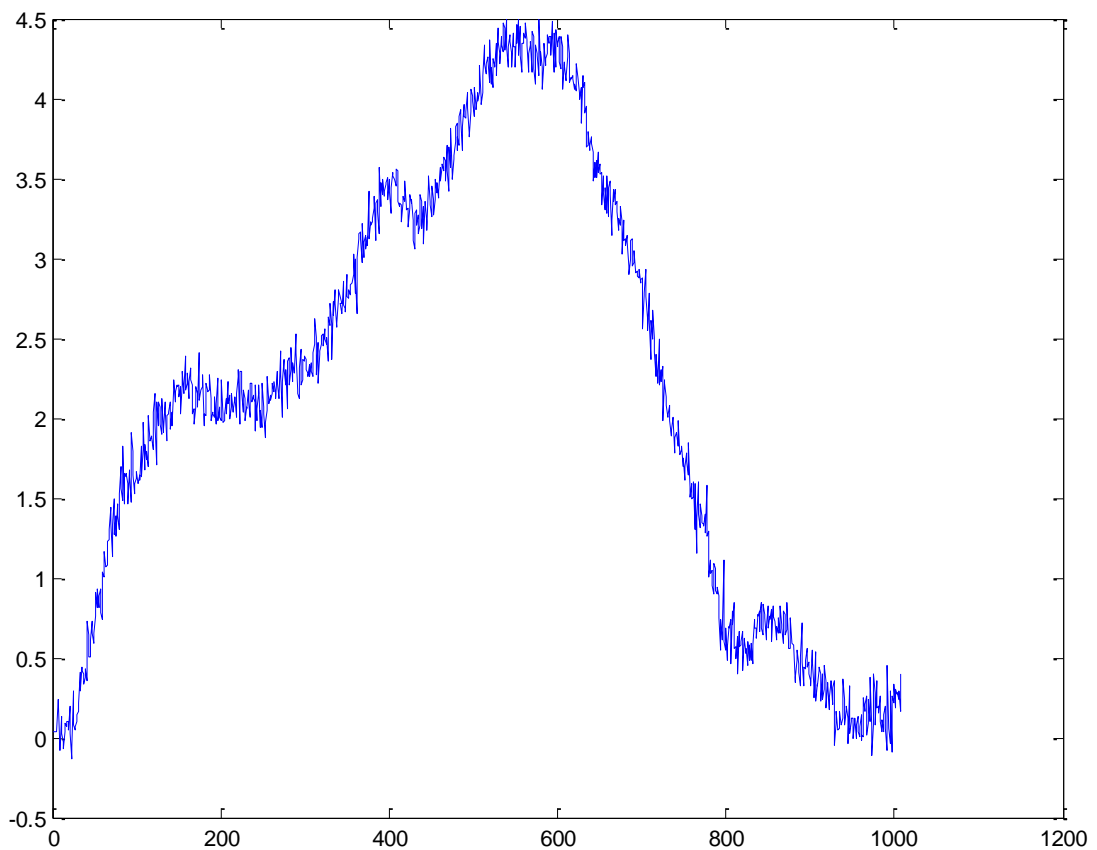


Рисунок 4.13 – Реакція регулятора на підвищення вологості та зміни температури зернової маси

Аналіз представлених графіків показує, що система автоматичного регулювання майже наполовину зменшує шкідливий вплив різкого підвищення вологості та забезпечує подальше ефективне охолодження зерна в силосі елеватора.

Отже, синтезований регулятор, обраний на основі найкращих показників якості ( $\sigma_x = 0,63$ ;  $\sigma_u = 2,67$ ;  $J = 0,27$ ), ефективно виконує функцію підтримки температури в силосі елеватора навіть при підвищеній вологості. Це позитивно впливає на якість і термін зберігання зерна. Водночас при значному збільшенні вологості рекомендується попереднє просушування зерна до заданого рівня для забезпечення безпечного та ефективного зберігання.

Впровадження системи автоматичного регулювання на базі мікроконтролера AT90S8515 забезпечує простоту та ефективність її експлуатації, а також дозволяє застосовувати гнучке програмне забезпечення, яке адаптує систему до різних кліматичних умов.

## Висновки

1. Було досліджено технологію зберігання зерна та його фізичні властивості, розглядаючи його не лише як біологічний матеріал, а й як об'єкт для системи регулювання.
2. Створено структурну схему системи автоматичного регулювання температури зерна в силосі елеватора, що працює за принципом активного охолодження повітрям, для якої були підібрані термopідвіска, вентилятор та холодильна установка.
3. Було виконано синтез передаточних функцій при різних значеннях вагових коефіцієнтів з метою забезпечення максимально ефективного регулювання температури зерна в силосі елеватора.
4. Під час оцінки якості системи було обрано регулятор, що показав найкращі результати: функціонал якості  $J = 0,27$ , середньоквадратичне відхилення вихідного сигналу  $\sigma_x = 0,63$  та середньоквадратичне відхилення управляючого сигналу  $\sigma_u = 2,67$ .
5. Розроблено програмний алгоритм для реалізації оптимального регулятора, а також виконана його апаратна реалізація на мікроконтролері AT90S8515 з побудовою відповідної електричної принципової схеми.
6. В ході дослідження встановлено, як вологість впливає на ефективність роботи спроектованої системи регулювання. Результати показали, що розроблена система успішно виконує поставлене завдання підтримки температури навіть за умов підвищеної вологості.

## Список літератури

1. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування: Підручник. – 2-ге вид., – К.: Либідь, 2007. - 656 с.
2. Автоматизація технологічних процесів і виробництв харчової промисловості: Підручник/ Ладанюк А.П.,Трегуб В.Г., Ельперін І.В., Цюцюра В.Д. – К.: Аграрна освіта, 2001 – 224 с.
3. Аналіз та синтез систем автоматичного керування в MATLAB. Навчальний посібник/ О.Г. Гурко, І.Ф.Єрмоєнко. – Харків: ХНАДУ, 2011. - 286 с.
4. А.П. Ладанюк Теорія автоматичного керування технологічних об'єктів: Навч. посіб. / А.П. Ладанюк, К.С. Архангельська, Л.О. Власенко – К.: НУХТ, 2014. – 274 с.
5. Автоматизація виробничих процесів: навч. посіб. / Б. М. Гончаренко, С. І. Осадчий, Л. Г. Віхрова [та ін.]. - Кіровоград: Лисенко В.Ф., 2016. - 352 с.
6. Блохін Л.М., Буриченко М.Ю. Статистична динаміка систем управління: Підручник. – К.: НАУ, 2003. – 208 с.
7. Зайцев Г.Ф., Стеклов В.К., Бріцький О.І. Теорія автоматичного управління. – К.: Техніка, 2002. – 688 с.
8. Технології конструювання сучасних конкурентоспроможних комплексів керування стохастичним рухом об'єктів : монографія / Л. М. Блохін та ін., Кропивницький: Лисенко В.Ф., 2023. 292 с.
9. Ткаченко Р. Ю. Теоретичні та прикладні аспекти розробки комп'ютерних систем //Технології проектування і розробки інформаційних систем, 2018 – С. 234.
- 10.Åström K.J., Hägglund T. Advanced PID control. – ISA (The Instrumentation, System, and Automation Society) , 2006. — 460 p.
11. Matlab Documentation.[Електронний ресурс]. - Режим доступу: - <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/control>.
- 12.Simulink Documentation [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/simulink>.

13. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці : підруч. Львів : Афіша, 2005. 350 с.
14. Гогіташвілі Г. Г., Лапін В. М. Основи охорони праці : навч. посіб. 3-є вид., стереотипн. Львів : «Новий Світ – 2000». 2006. 232 с.
15. Босов Є. П., Жесан Р. В., Каліч В. М., Голик О. П., Зубенко В. О. Охорона праці при проектуванні систем автоматизації виробництва : навч. посіб. 2-е вид., перероб. і доп. Кропивницький : ЦНТУ, 2022. 208 с.
16. Конституція України. Київ : Андронум, 2020. 60 с.
17. Про охорону праці : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/2694-12#Text> (дата звернення: 21.10.2025).
18. Основи законодавства України про охорону здоров'я : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2801-12#Text> (дата звернення 03.11.2025).
19. Про систему громадського здоров'я : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2573-20#n840> (дата звернення 03.11.2025).
20. Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/39/95-%D0%B2%D1%80> (дата звернення 29.10.2025).
21. Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1105-14> (дата звернення 24.10.2025).
22. Кодекс цивільного захисту України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/5403-17#Text> (дата звернення: 17.11.2025).
23. Кодекс законів про працю України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/322-08#Text> (дата звернення: 07.10.2025).
24. Правила улаштування електроустановок : вид. офіц. Київ :

Міненерговугілля України, 2017. 617 с.

25. Вікіпедія. Вільна енциклопедія : веб-сайт. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/> (дата звернення: 31.09.2025).
26. Жидецький В. Ц., Джигирей В. С., Сторожук В. М., Туряб Л. В., Лико Х. І. Практикум з охорони праці. Львів : Афіша, 2000. 352 с.
27. Іванов В. Г., Дзюндзюк Б. В., Олександров Ю. М. Охорона праці в електроустановках : навч. посіб. / за ред. В. Г. Іванова. Київ : Око, 1994. 226 с.

## ДОДАТОК А

### ОХОРОНА ПРАЦІ

#### **А.1 Законодавчі та нормативні акти України з питань охорони праці**

Охорона праці (ОП) – це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних та лікувально-профілактичних заходів і засобів, спрямованих на збереження здоров'я та працездатності людини в процесі праці [13, 14, 15].

Охорона життя та здоров'я громадян у процесі їх трудової діяльності, створення безпечних і нешкідливих умов праці є одним із найважливіших державних завдань.

Правовими актами, у яких закріплено основні положення вітчизняного законодавства про ОП, є загальні закони, а також спеціальні нормативні та підзаконні акти.

Серед загальних законів, які утворюють правову основу з питань ОП, перш за все, слід відзначити: Конституцію України; Закони України: «Про охорону праці», «Основи законодавства України про охорону здоров'я», «Про систему громадського здоров'я», «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку», «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування»; Кодекс цивільного захисту України (КЦЗ); Кодекс законів про працю України (КЗпП) [13, 14, 15].

Спеціальними нормативними актами в галузі ОП є Нормативно-правові акти з ОП (НПАОП), Державні стандарти України (ДСТУ), Державні будівельні норми (ДБН), Санітарні норми, Правила пожежної безпеки, Правила улаштування електроустановок (ПУЕ) та інші нормативні документи [13, 14, 15].

В Основному Законі – Конституції України [16] питанням ОП присвячені декілька статей.

В статті 43 Конституції України записано: «Кожен має право на належні, безпечні і здорові умови праці, на заробітну плату, не нижчу від визначеної

законом».

Кожен, хто працює, має право на відпочинок (стаття 45 Конституції України).

У тексті статті 46 Конституції України вказано на те, що громадяни мають право на соціальний захист.

Основоположним законодавчим документом у галузі ОП є Закон України «Про охорону праці» [17], дія якого поширюється на всі підприємства, установи і організації, незалежно від форм власності та видів їх діяльності, на усіх громадян, які працюють.

З прийняттям у 1992 р. Закону України «Про охорону праці» принципово змінилися взаємовідносини власника підприємства і робітника у вирішенні проблем ОП. Власник підприємства почав нести повну відповідальність за створення безпечних умов праці, а за державою закріпилася функція нагляду за ОП, чим раніше опікалися профспілки.

В цьому Законі були задекларовані основні принципи державної політики в галузі ОП [17]:

- пріоритет життя і здоров'я працівників по відношенню до результатів виробничої діяльності підприємства;
- повна відповідальність роботодавця за створення безпечних і нешкідливих умов праці;
- повне відшкодування шкоди особам, які потерпіли від нещасних випадків на виробництві і професійних захворювань;
- здійснення навчання населення, професійної підготовки, підвищення кваліфікації працівників з ОП та ін.

Відповідно до статті 49 Закону України «Про охорону праці» [17], за порушення законодавчих та інших нормативних актів про ОП, створення перешкод для діяльності посадових осіб органів державного нагляду за ОП і представників професійних спілок винні притягаються до дисциплінарної, адміністративної, кримінальної відповідальності, згідно із законодавством.

Питання охорони здоров'я та гігієни праці регламентуються Законами

України «Основи законодавства України про охорону здоров'я» [18] та «Про систему громадського здоров'я» [19]. Вони визначають правові, організаційні, економічні та соціальні засади охорони здоров'я в Україні; регулюють суспільні відносини у цій галузі; передбачають розробку й реалізацію адміністрацією підприємств санітарних та протиепідемічних заходів; здійснення, в необхідних випадках, лабораторного контролю за дотриманням вимог санітарних норм стосовно рівнів шкідливих факторів виробничого середовища; формування органів та установ державної санітарно-епідеміологічної служби при надзвичайній події чи ситуації, що становлять небезпеку для здоров'я населення; відшкодування, в установленому порядку, працівникам та іншим громадянам збитків, яких завдано їх здоров'ю в результаті порушення санітарного законодавства.

Основними принципами державної політики в сфері використання ядерної енергії та радіаційного захисту, відображені у Законі України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку» [20], є:

- пріоритет захисту людини та навколишнього середовища від впливу іонізуючого випромінювання;
- забезпечення безпеки під час використання ядерної енергії;
- відкритість і доступність інформації, пов'язаної з використанням ядерної енергії і т. ін.

Основними принципами соціального страхування від нещасного випадку Закон України «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування» [21] проголошує:

- обов'язковий порядок страхування працівників, а також учнів та студентів навчальних закладів;
- сплату страхових внесків тільки роботодавцями;
- своєчасне та повне відшкодування шкоди потерпілим;
- надання державних гарантій застрахованим у реалізації їх прав та ін.

КЦЗ України [22] регулює відносини, пов'язані із захистом населення, територій, навколишнього природного середовища та майна від надзвичайних ситуацій, реагуванням на них, функціонуванням єдиної державної системи

цивільного захисту, та визначає повноваження органів державної влади, Ради міністрів Автономної Республіки Крим, органів місцевого самоврядування, права та обов'язки громадян України, іноземців та осіб без громадянства, підприємств, установ та організацій незалежно від форми власності.

Одним із головних документів, який забезпечує чітке виконання службових обов'язків працівниками, є КЗпП України [23]. КЗпП трактує вимоги до трудової діяльності громадян в Україні і регулює трудові відносини всіх працівників, сприяючи зростанню продуктивності праці і поліпшенню її якості. Кодекс спрямований на охорону трудових прав працюючих.

В КЗпП України зазначені наступні положення [23]: забороняється залучати до надурочних робіт вагітних жінок і жінок, які мають дітей віком до трьох років (стаття 176), а також осіб молодших 18 років (стаття 192); забороняється застосування праці жінок на важких роботах і роботах із шкідливими або небезпечними умовами праці (стаття 174).

НПАОП, які до початку 2003 р. носили назву Державні нормативні акти про ОП (ДНАОП), – це правила, норми, положення, стандарти, інструкції та інші документи, обов'язкові до виконання [13, 14, 15]. Законодавством передбачено, що залежно від сфери дії НПАОП можуть бути міжгалузевими і галузевими. Реєстр ДНАОП, що діють на території України, виданий Держнаглядохоронпраці в 1997 р. З 2003 р. ведеться реєстр НПАОП, який постійно поповнюється [15].

Серед НПАОП досить важливе місце посідають Державні стандарти України (ДСТУ) та Державні будівельні норми (ДБН) [13, 14, 15]. ДСТУ почали розроблятися з 1992 р. і поступово вводилися в якості Національних стандартів у всіх сферах економіки, на заміну стандартам колишнього СРСР (Міждержавних стандартів ГОСТ). ДБН – нормативний акт технічного характеру, що встановлює обов'язкові вимоги до об'єкта нормування у будівництві. Об'єктами нормування у будівництві є: планування та забудова території, об'єкт будівництва, містобудування та архітектури і його складові частини, склад і зміст документації об'єктів будівництва, містобудування та архітектури тощо [13, 15].

Складовою частиною права в галузі гігієни праці є постанови та положення (норми) затверджені Міністерством охорони здоров'я України (наприклад, «Положення про медичний огляд працівників певних категорій», «Перелік важких робіт і робіт з шкідливими і небезпечними умовами праці, на яких забороняється застосування праці неповнолітніх»), Державні санітарні правила і норми (ДСанПіН) стосовно окремих факторів виробничого середовища, певних технологічних процесів і конкретних виробництв, Державні санітарні норми та правила (ДСНП), Державні санітарні норми (ДСН), Державні санітарні правила (ДСП) [13, 14, 15].

Доповнюють право у в галузі пожежної безпеки Правила пожежної безпеки України, постанови Верховної Ради України, укази і розпорядження Президента України, декрети, постанови та розпорядження Кабінету Міністрів України, рішення органів державної виконавчої влади, місцевого та регіонального самоврядування, прийняті в межах їх компетенції [13, 14, 15].

ПУЕ визначають будову, принципи улаштування, особливі вимоги до окремих систем, їх елементів, вузлів і комунікацій електроустановок. ПУЕ встановлюють вимоги до електроустановок загального призначення змінного струму напругою до 750 кВ та постійного струму напругою до 1,5 кВ [24].

Власники підприємств, установ, організацій, або уповноважені ними органи, розробляють, на основі НПАОП, і затверджують власні положення, інструкції та інші нормативні акти з ОП, що діють у межах підприємства, установи, організації [13, 14, 15].

До основних нормативних актів підприємства належать:

- Положення про систему управління ОП на підприємстві;
- Положення про службу ОП підприємства;
- Положення про комісію з питань ОП підприємства;
- Положення про роботу уповноважених трудового колективу з питань ОП;
- Положення про навчання, інструктаж і перевірку знань працівників з питань ОП;

- Положення про організацію і проведення первинного та повторного інструктажів, а також пожежно-технічного мінімуму;
- Наказ про порядок атестації робочих місць щодо їх відповідності нормативним актам про ОП;
- Положення про організацію попереднього і періодичного медичних оглядів працівників;
- Положення про санітарну лабораторію підприємства;
- Інструкції з ОП для працюючих за професіями і видами робіт;
- Загальнооб'єктові та цехові інструкції про заходи пожежної безпеки;
- Перелік робіт з підвищеною небезпекою;
- Перелік посад посадових осіб підприємства, які зобов'язані проходити попередню і періодичну перевірку знань ОП;
- Наказ про організацію безкоштовної видачі працівникам певних категорій лікувально-профілактичного харчування;
- Наказ про організацію безкоштовної видачі молока або інших рівноцінних харчових продуктів працівникам підприємства, що працюють у шкідливих умовах;
- Наказ про порядок забезпечення працівників підприємства спецодягом, спецвзуттям та іншими засобами індивідуального захисту.

Цей перелік може змінюватись і доповнюватись, залежно від специфіки кожного конкретного підприємства [13, 14, 15].

Держава виступає гарантом створення безпечних і нешкідливих умов роботи для працівників підприємств, установ і організацій всіх форм власності.

## **А.2 Шкідливі та небезпечні фактори виробництва при експлуатації системи автоматичного регулювання температури зберігання зерна на елеваторі**

Шкідливий виробничий фактор – виробничий фактор, вплив якого на

працівника за певних умов призводить до захворювання або зниження працездатності [13].

Небезпечний виробничий фактор – виробничий фактор, дія якого на працівника, при певних умовах, призводить до травм або раптового різкого погіршення здоров'я [13].

Усі шкідливі та небезпечні фактори, що виникають у виробничих умовах, поділяються за природою дії на: фізичні, хімічні, біологічні, психофізіологічні [13, 14, 15].

До *фізичних шкідливих та небезпечних виробничих факторів* на елеваторі належать:

- можливість падіння в зерно – потрапляння працівників під час роботи з насипами в зернову масу, особливо в силосах, бункерах або завальних ямах;
- роботи на висоті – можливе падіння з висоти під час обслуговування, ремонту, роботи на галереях, люках.
- рухомі машини та механізми, пересувні частини виробничого устаткування – є можливість затягування одягу, волосся, кінцівок працівників у конвеєри, норії, шнеки;
- підвищений рівень шумів та вібрацій на робочому місці – дія шуму може спричиняти підвищення кров'яного тиску (головний біль, запаморочення, загальну слабкість, безсоння), прискорений пульс і дихання, послаблення уваги, деякі порушення координації руху, зниження працездатності, глухоту; загальна вібрація викликає струс всього організму, а місцева залучає до коливального руху окремі частини тіла, що можуть викликати навіть механічні пошкодження і розрив окремих органів людини, викликати професійне захворювання – «вібраційну хворобу»;
- несприятливі метеорологічні (мікрокліматичні) умови на робочих місцях – визначаються діючою на організм людини сукупністю

- температури, вологості, руху повітря та теплового випромінювання нагрітих поверхонь;
- запиленість повітря робочої зони – негативно впливає на працівників, спричиняючи професійні захворювання (респіраторні, серцево-судинні) через вдихання шкідливих речовин, знижуючи працездатність, погіршуючи освітленість та мікроклімат, може призводити до віддалених наслідків для здоров'я;
  - несправність обладнання – неправильно змонтоване, зношене або неогороджене обладнання може стати причиною нанесення травм, виникнення аварій, пожеж, вибухів;
  - пожежо- та вибухонебезпека – зерновий пил, що накопичується, утворює пило-повітряну суміш, яка може легко спалахнути або вибухнути;
  - статична та природна електрика – статична електрика може спричинити займання зернового пилу та інших горючих матеріалів (палив, мастил, хімічних речовин); у місцевостях, з підвищеною грозовою активністю, блискавка може вражати устаткування, механізми і споруди (часто, доволі висотні);
  - небезпечні значення напруг в електричних колах – переважна більшість промислового і сільськогосподарського обладнання працюють на напругах  $\sim 230$  В /  $\sim 400$  В;
  - нераціональне освітлення на робочих місцях – відсутність чи нестача природного світла; недостатня освітленість робочої зони та ін.

*Хімічні шкідливі та небезпечні виробничі фактори:*

- шкідливі речовини на робочих місцях – теплові агенти, хімічні сполуки, що використовуються для протруювання зерна, обробки обладнання, прибирання (за характером дії на організм людини поділяються на: загальнотоксичні, дратівні, канцерогенні, мутагенні та такі, що впливають на репродуктивну функцію);

- пи́л та аерозолі – висока запиленість повітря зерновий пилом і хімічними речовинами, що може викликати респіраторні захворювання, алергії, отруєння.

*Біологічні шкідливі та небезпечні фактори виробництва:*

- патогенні мікроорганізми – бактерії, віруси, грибки, спори і пилок рослин;
- макроорганізми – рослини, комахи, тварини;
- продукти життєдіяльності мікро- та макроорганізмів.

*Психофізіологічні шкідливі та небезпечні фактори виробництва:*

- нервово-психічні та емоційні перевантаження – тривала концентрація, розумове перенапруження, відповідальність, робота в умовах високого темпу, несприятливий мікроклімат у колективі, конфлікти призводять до фізичних (головний біль, безсоння) і психологічних (депресивні стани) наслідків, а також зниження працездатності та підвищення ризику травматизму;
- фізичні перевантаження (статичні й динамічні) – це стан виснаження нервової системи через тривалий стрес, що виникає через надмірні вимоги до психіки в роботі та житті (відповідальність, брак відпочинку, конфлікти) і проявляється комплексом симптомів: втомою, дратівливістю, тривожністю, проблемами зі сном, зниженням концентрації та ефективності, а також фізичними проявами (головний біль, напруження м'язів), що можуть призводити до емоційного вигорання чи навіть нервового зриву, якщо їх не розпізнавати вчасно;
- монотонність праці – монотонна робота з механізмами призводить до зниження уваги, стомлюваності, нервово-психічного перенапруження, порушення координації та збільшення ризику травм; може викликати як короткострокові (втома, роздратування), так і довгострокові наслідки, знижуючи продуктивність та якість роботи;

– перенапруження аналізаторів (зорового, слухового, нервового) під час роботи проявляється фізичним дискомфортом (втома очей, головний біль), зниженням працездатності (увага, точність), емоційною напругою (подразливість, зниження інтересу) та фізіологічними змінами (червоніння очей, затуманення зору); вимагають перерв або змін у робочому процесі, щоб уникнути хронічних проблем.

За характером дії на організм людини шкідливі та небезпечні виробничі чинники поділяються на 4 класи [14]:

1-й – надзвичайно небезпечні;

2-й – високонебезпечні;

3-й – помірно небезпечні;

4-й – малонебезпечні.

Один і той же небезпечний та шкідливий виробничий фактор, за природою своєї дії, може належати одночасно до кількох різних груп [13, 14, 15].

Конкретні умови діяльності істотно впливають на психічні та життєво важливі функції людини. Якщо вплив факторів (з врахуванням їх взаємодії) в конкретних умовах діяльності такий, при якому забезпечується нормальне здійснення психічних та життєво важливих функцій організму, не виникає високого напруження компенсаторних систем організму і вдало виконується задана трудова діяльність, то такі умови можуть бути визначені як сприятливі, або комфортні, а в найкращих умовах – як оптимальні. Коли, в силу дії факторів, виникає високе напруження компенсаторних систем організму, то такі умови визначаються як несприятливі, або дискомфортні, а при вираженому несприятливому ефекті – як екстремальні.

### **А.3 Заходи з усунення або зменшення впливу шкідливих та небезпечних факторів виробництва при експлуатації системи автоматичного регулювання температури зберігання зерна на елеваторі**

Безпечність виробничого устаткування – це властивість виробничого устаткування відповідати вимогам безпеки праці під час монтажу (демонтажу) і експлуатації в умовах, установлених нормативною документацією.

Для усунення або зменшення впливу шкідливих та небезпечних факторів на елеваторі, слід дотримуватись основних правил техніки безпеки та виробничої санітарії [13, 14, 15]:

- територія підприємства має бути огорожена і доступ до неї стороннім особам заборонений;
- у місцях проведення вантажно-розвантажувальних робіт територія повинна бути спланована і мати тверде покриття. Нахил площ повинен бути не більше 3°;
- до робіт на висоті (понад 1,3 м), що класифікуються як роботи підвищеної небезпеки, допускаються працівники від 18 років, що пройшли медогляд та спецнавчання, з обов'язковим використанням засобів індивідуального захисту (ЗІЗ) (каска, запобіжний пояс), з огороженням і належним освітленням робочого місця та оформленням наряду-допуску; роботи на висоті забороняються під час негоди (сильний вітер, ожеледиця, гроза);
- на транспортних шляхах мають бути встановлені попереджувальні знаки, вивішені плакати, які забороняють переходити шляхи у невстановленому місці;
- під час роботи всі працівники мають дотримуватись засобів колективної та особистої гігієни і виробничої санітарії.

Головне джерело проблем з безпекою на елеваторі – несправне, неправильно змонтоване та некоректно розраховане обладнання, що загрожує життю та здоров'ю персоналу. При порушенні правил монтажу та підключення елементів устаткування персонал може серйозно травмуватися, а роботодавець буде змушений виплатити компенсацію, згідно зі статтею 153 КЗпП України [23].

Безпечність будь-якого виробничого устаткування забезпечується

правильним вибором принципів дії, конструктивних схем, елементів конструкції; використанням засобів механізації, автоматизації та дистанційного керування; застосуванням у конструкції засобів захисту; дотриманням ергономічних вимог; включенням вимог безпеки в технічну документацію з монтажу, експлуатації, ремонту; транспортування та зберігання устаткування; використанням у конструкції устаткування безпечних та нешкідливих матеріалів.

Для того, щоб запобігти виникненню небезпеки при раптовому вимкненні джерел енергії всі робочі органи, а також пристрої, які використовуються для захоплення, затискування та підймання заготовок, деталей виробів, тощо, повинні оснащуватись спеціальними захисними пристосуваннями. Причому необхідно унеможливити самовільне вмикання робочих органів при відновленні подачі енергії.

Нещасний випадок на зернових підприємствах також може статися через неухважність працівника та неправильну експлуатацію технологічного обладнання. До найнебезпечніших ситуацій можна віднести:

- падіння з висоти або в завальну яму;
- попадання кінцівок, волосся та частин одягу в транспортер;
- перевертання ємностей при неправильному навантаженні та вивантаженні зерна в силоси;
- перевантаження силосів масами з насипною щільністю вище гранично допустимого значення.

Норії та транспортери підпадають під дію спеціальних норм, що регламентують проектування, встановлення та експлуатацію вантажопідйомних та транспортних механізмів. Лише сертифікований підрядник може гарантувати дотримання технічних регламентів та ДБН при монтажі спецобладнання і ремонтних роботах. Він повинен мати відповідні допуски та ліцензії, що підтверджують достатній рівень матеріально-технічного оснащення та належної підготовки персоналу для якісного виконання відповідальних робіт.

Для запобігання механічному травматизму від рухомих частин

обладнання та нагрітих елементів конструкцій застосовуються різноманітні капоти, екрани, огороження, що унеможливають безпосередній контакт устаткування із частинами тіла працівника. Також, в обов'язковому порядку, використовуються захисні і запобіжні пристрої, пристрої, автоматичного контролю та сигналізації (світлової і звукової), дистанційне керування; наносяться попереджувальні написи; вивішуються знаки безпеки.

Зменшення вібрації в джерелі її виникнення досягається шляхом застосування таких кінематичних та технологічних схем, які усувають чи знижують до мінімуму дію динамічних сил. Так, вібрація ослаблюється при заміні кулачкових та кривошипних механізмів на механізми, що обертаються з рівномірною швидкістю, механічних приводів – на гідравлічні тощо. Зменшення вібрації досягається також статичним та динамічним зрівноважуванням механізмів і об'єктів, що обертаються. Слід зазначити, що дія динамічних сил може посилитись внаслідок спрацювання окремих механізмів, появи зазорів та люфтів, поганого зчеплення деталей, що призводить до посилення вібрації. При проектуванні устаткування важливо передбачити недопущення резонансних режимів його роботи. Це досягається раціональним вибором маси та жорсткості коливальної системи або частоти змушувальної сили [13, 14, 15].

Заходи і засоби захисту від шуму поділяються на колективні та індивідуальні, причому останні застосовуються лише тоді, коли заходами та засобами колективного захисту не вдається знизити рівні шуму на робочих місцях до допустимих значень.

Зменшення шуму у самому джерелі – найбільш радикальний засіб боротьби з шумом, що створюється устаткуванням [14]. Досвід показує, що ефективність заходів щодо зниження шуму устаткування, яке вже працює, досить невисока, тому необхідно прагнути до максимального зниження шуму в джерелі ще на стадії проектування устаткування.

Організаційно-технічні засоби захисту від шуму передбачають: застосування мал шумних технологічних процесів та устаткування, оснащення шумного устаткування засобами дистанційного керування, дотримання правил

технічної експлуатації, проведення планово-попереджувальних оглядів та ремонтів.

Для зменшення шкідливого впливу виробничого шуму на працівників шумних виробництв, послаблення передавання його в сусідні приміщення застосовують звуко- і віброізоляцію, звуко- і вібропоглинання та глушники шуму.

Звукоізоляція є ефективним засобом зменшення рівня шуму на шляху його поширення, що реалізується шляхом встановлення звукоізоляційних перешкод (перегородок, кабін, кожухів, екранів) [13]. Принцип звукоізоляції базується на тому, що більша частина звукової енергії, яка потрапляє на перешкоду, відбивається і лише незначна її частина проникає крізь неї.

До ЗІЗ від шуму належать навушники, протишумові вкладки (беруші), шумозаглушувальні шоломи. Вибір ЗІЗ обумовлюється різновидом та характеристикою шуму на робочому місці, зручністю використання засобу при виконанні даної робочої операції та конкретними кліматичними умовами.

Важливе значення для профілактики перегрівання працівників має спецодяг. Він повинен бути повітро- та вологопроникним (бавовняним, з льону, грубововняного сукна), мати зручний покрій. Захист від дії зниженої температури досягається використанням теплового сезонного спецодягу.

Ризики загорянь та вибухів на елеваторах головним чином пов'язані з утворенням великої кількості дрібнодисперсного легкозаймистого пилу при переміщенні зернової маси. Пожежонебезпечність пилоповітряної суміші залежить від рівня вологості та температури, вмісту кисню в повітрі, близькості джерел вогню, іскор, статичних розрядів та розпечених предметів.

У місцях скупчення пилу (норії, вентилятори, конвеєри) слід дотримуватись посилених запобіжних заходів, оскільки у разі займання суміші виникають множинні вогнища загоряння та серії вибухів у прилеглих приміщеннях, що тягнуть за собою масштабні руйнування, після яких не завжди можливо відновити об'єкт.

Для забезпечення пожежо- та вибухобезпеки на підприємстві

передбачено наступні засоби пожежогасіння:

- внутрішні пожежні крани;
- вогнегасники хімічні;
- вогнегасні речовини – ящики з піском;
- вуглекислотні вогнегасники;
- пожежні щити з азбестовим полотном, відрами, лопатами, сокирами, баграми.

Пожежна профілактика передбачає заходи з попередження та ліквідації пожеж, включаючи обмеження сфери розповсюдження вогню та забезпечення успішної евакуації людей та майна із приміщень, які горять.

Конструкції устаткування повинні забезпечувати захист людини від ураження електричним струмом, запобігати накопиченню статичної електрики в небезпечних кількостях. Устаткування має бути оснащено засобами сигналізації про порушення нормального режиму роботи, а в необхідних випадках (аваріях, небезпечних пошкодженнях, режимах близьких до небезпечних) – засобами автоматичної зупинки, гальмуванні та від'єднання від джерела енергії. Для захисту будівель підприємства і персоналу від ураження природною електрикою (блискавкою) необхідно передбачити системи блискавкозахисту.

Для створення сприятливих умов зорової роботи, які б виключали швидку втомлюваність очей, виникнення професійних захворювань, нещасних випадків і сприяли підвищенню продуктивності праці та якості продукції, виробниче освітлення повинно відповідати наступним вимогам: створювати на робочій поверхні освітленість, що відповідає характеру зорової роботи і не є нижчою за встановлені норми; забезпечити достатню рівномірність та постійність рівня освітленості у виробничих приміщеннях; не створювати засліплювальної дії, як від самих джерел освітлення, так і від інших предметів, що знаходяться в полі зору; повинен бути достатній для розрізнення деталей контраст поверхонь, що освітлюється; не створювати небезпечних та шкідливих виробничих чинників (шум, теплові випромінювання, небезпека ураження струмом, пожежо- та вибухонебезпека світильників); повинно бути надійним і простим в експлуатації,

економічним та естетичним [13, 14, 15, 25].

До загальних заходів та засобів попередження шкідливої дії пилу, хімічних сполук та мікроорганізмів, що знаходяться у повітрі робочої зони й захисту працюючих належать [13, 14, 15]:

- вилучення шкідливих речовин у технологічних процесах, заміна шкідливих речовин менш шкідливими і т.п.;
- удосконалення технологічних процесів та устаткування;
- автоматизація і дистанційне керування технологічними процесами, при яких можливий безпосередній контакт працюючих з шкідливими речовинами;
- герметизація виробничого устаткування, робота технологічного устаткування під розрідженням, локалізація шкідливих виділень за рахунок місцевої вентиляції, аспіраційних укриттів;
- нормальне функціонування систем опалення загальнообмінної вентиляції, кондиціонування повітря, очистки викидів у атмосферу;
- попередні та періодичні медичні огляди робітників, які працюють у шкідливих умовах, профілактичне харчування, дотримання правил особистої гігієни.

Найбільш дієвим способом захисту від психофізіологічних небезпечних і шкідливих впливів на працівника є правильна організація його робочого часу та місця роботи. Мають бути раціонально сплановані робочі зміни та час відпочинку, надаватись технологічні та гігієнічні перерви, створюватись позитивний моральний клімат у трудовому колективі. Щоб уникнути негативних реакцій на монотонність праці, необхідно при прийнятті на роботу проводити співбесіду та відповідне тестування, аби пересвідчитись у спроможності працівника здійснювати монотонну роботу протягом усього робочого часу.

Власник елеватора зобов'язаний вживати комплексних заходів для запобігання аваріям, травмам, нещасним випадкам та пожежам на виробництві:

- спеціальне навчання та вступний інструктаж з техніки безпеки;

- дотримання норм проектування та правил експлуатації спецобладнання;
- надання персоналу спецодягу та ЗІЗ;
- планова профілактика та регулярне технічне обслуговування основних вузлів;
- контроль мікроклімату та рівня запиленості у виробничих приміщеннях;
- підтримка чистоти та порядку на об'єкті;
- встановлення пожежної сигналізації та автоматичного пожежогасіння;
- організація та утримання у справному стані шляхів евакуації;
- виведення з експлуатації та професійний ремонт несправних елементів обладнання.

При проектуванні устаткування, необхідно обов'язково враховувати умови його експлуатації з тим, щоб, при дії на нього різноманітних природних чинників – вологи, сонячної радіації, високих та низьких тисків і температур, а також механічних коливань, агресивних речовин тощо, устаткування не ставало небезпечним.

Для реалізації заходів з електробезпеки, розрахуємо захисне заземлення для електрообладнання системи автоматичного регулювання температури зберігання зерна на елеваторі.

#### **А.4 Розрахунок захисного заземлення для електрообладнання системи автоматичного регулювання температури зберігання зерна на елеваторі**

Захисним заземленням називають навмисне електричне з'єднання з нульовим захисним провідником металевих нормально неструмопровідних частин, які можуть опинитись під напругою [13, 25]. Корпуса електричних машин, трансформаторів, апаратів та інші металічні неструмопровідні частини

можуть виявитися під напругою при замиканні їх струмопровідних частин на корпус. Якщо корпус при цьому не має контакту із землею, дотикання до нього так само небезпечно, як і дотикання до фази. Якщо ж корпус заземлений, він виявиться під напругою рівною:  $U_3 = I_3 \cdot R_3$ , людина, яка дотикається до цього корпусу, потрапляє під напругу дотику  $U_0 = U_3 \cdot \alpha$ . Звідси видно, що чим менший опір  $R_3$  і коефіцієнт напруги дотику  $\alpha$ , тим менший струм крізь людину, яка стоїть на землі і дотикається до корпусу приладу, який знаходиться під напругою.

При дотиканні людиною до корпусу увімкненого приладу струм крізь неї дорівнює  $I_n = I_3 \cdot (R_3 / R_n)$ , де  $R_n$  – опір людини електричному струму. Звідси видно, що виносний опір захищає за рахунок малого опору заземлення. Розрахунок захисного заземлення зводиться до визначення числа вертикальних заземлювачів та довжини з'єднувальної смуги з розміщенням на плані [25].

Початкові дані:

$R_{\text{заз}} \leq 4 \text{ Ом};$

Ґрунт – глина;

$R_{\text{прир. заз.}} = 15 \text{ Ом};$

Заземлювач – кутник із полицею 40 мм;

Шина з'єднання – 40 мм

Розрахунок захисного заземлення проводиться, у відповідності з методикою, викладеною у [25], в наступній послідовності:

1. Визначається розрахунковий струм замикання на землю  $I_3$ , А, та норма на опір заземлення  $r_3$ , в залежності від напруги, режиму нейтралі, потужності електроустановки.

На елеваторі використовується обладнання, напруга живлення якого не перевищує 1000 В, тому розрахунковий струм замикання на землю не перевищує 10 А, тобто  $I_3 \leq 10 \text{ А}$ .

2. Визначається розрахунковий опір ґрунту, з урахуванням кліматичного коефіцієнту  $\psi$ , за формулою  $R_{\text{розрах.}} = r \cdot \psi$ . Згідно початкових даних, маємо ґрунт

глина, для якого опір  $0,7 \cdot 10^2$  Ом·м. Обираємо кліматичний коефіцієнт для сухого ґрунту, тоді отримаємо:  $R_{\text{розрах.}} = 0,7 \cdot 10^2 \cdot 1,2 = 84$  Ом·м.

3. Згідно початкових даних, природній опір дорівнює  $R_{\text{прир.зас.}} = 15$  Ом.

4. Визначається опір штучного заземлювача. Якщо вважати, що штучні та природні заземлювачі з'єднані паралельно, то загальний їх опір не повинен перевищувати  $r_3$ , тобто:

$$r_3 = \frac{R_{\text{природзаземл.}} \cdot R_{\text{шт.}}}{R_{\text{прир.засемл.}} + R_{\text{шт.}}}, \text{ звідки } R_{\text{шт.}} = \frac{R_{\text{прир.зас.}} \cdot r_3}{R_{\text{прир.зас.}} - r_3}.$$

Згідно початкових даних, маємо:  $R_{\text{прир.зас.}} = 15$  Ом та  $r_3 = 4$  Ом, тоді:

$$R_{\text{шт.}} = \frac{15 \cdot 4}{15 - 4} = \frac{60}{11} = 5.45 \text{ Ом.}$$

5. Визначаємо опір одного вертикального заземлювача  $R_{\text{в.з.}}$ , з урахуванням розрахункового опору ґрунту  $R_{\text{розрах.}}$ . Оберемо тип заземлювача стержньовий у ґрунті, тоді маємо наступну формулу для розрахунку опору:

$$R_{\text{в.з.}} = \frac{R_{\text{розрах.}}}{2\pi\ell\epsilon} \cdot \left( \ln \frac{2\ell\epsilon}{\alpha} + \frac{1}{2} \ln \frac{4H + \ell\epsilon}{4H - \ell\epsilon} \right).$$

Визначимо відстань  $H$  (вона дорівнює  $H = H_0 + \frac{1}{2}\ell\epsilon$ .) Для глини глибина закладання становить 0,7 м. Довжина стержньового кутикового заземлювача 2,5 м, тоді глибина закладання контуру заземлення:

$$H = 0,7 + \frac{1}{2} \cdot 2,5 = 1,95 \text{ м.}$$

Оскільки ми маємо кутиковий заземлювач, то приймається значення:  $\alpha = 0,95 \cdot B = 0,95 \cdot 0,04 = 0,038$ , де  $B$  – ширина полиці. Тоді:

$$R_{\text{в.з.}} = \frac{84}{2 \cdot 3,14 \cdot 2,5} \cdot \left( \ln \frac{2 \cdot 2,5}{0,038} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 1,95 + 2,5}{4 \cdot 1,95 - 2,5} \right) = 5,35 \cdot (4,37 + 0,3) = 27,83 \text{ Ом.}$$

6. Попередньо розміщуємо заземлювачі на плані, визначаємо кількість вертикальних заземлювачів  $n$  та відстань між ними  $a$ , і за цими даними приймаємо коефіцієнт використання вертикальних стержнів  $\eta_{\text{ст.}}$  при відношенні відстані між електродами до їх довжини.

$$\text{Розрахуємо попередню кількість вертикальних заземлювачів: } n = \frac{R_{\text{в.з.}}}{R_{\text{зас.}}}$$

Згідно початкових даних, маємо:  $n = \frac{27.83}{4} = 6,95$  шт.

Таким чином бачимо, що попередня кількість вертикальних заземлювачів  $n = 7$ .

Оскільки відстань між вертикальними заземлювачами повинна приблизно дорівнювати довжині вертикального заземлювача, то приймаємо відстань між заземлювачами 2,5 м. Таким чином маємо співвідношення  $Q = \frac{a}{\ell_в}$ , де  $Q$  – відстань між вертикальними заземлювачами;  $\ell_в$  – довжина заземлювача.

$$Q = \frac{2.5}{2.5} = 1.$$

Роблячи висновки, на підставі співвідношення, можемо сказати, що коефіцієнт використання вертикальних заземлювачів  $\eta_{заз.}$  буде дорівнювати 0,6.

7. Визначається опір з'єднувальних шин, з урахуванням коефіцієнта використання шини  $\eta_{ш.}$ , який буде дорівнювати 0,67.

$$R_{ш} = \frac{R_{розр}}{2\pi\ell_M} \ln \frac{2\ell_M^2}{\nu H_0}, \text{ де } \ell_M = 1.05 \cdot 2.5 \cdot 7 = 18.375 \text{ Ом.}$$

$$R_{ш} = \frac{84}{2 \cdot 3.14 \cdot 18.375} \cdot \ln \frac{2 \cdot 18.375^2}{0.04 \cdot 0.7} = 0.72 \cdot 10.1 = 7.272 \text{ Ом.}$$

8. Визначаємо опір одного вертикального заземлювача на з'єднувальній шині, з урахуванням обраних коефіцієнтів використання заземлювачів на шині:

$$R_{заз.од} = \frac{R_{в.з}}{\eta_{заз}} \text{ та } R_{ш.з} = \frac{R_{ш}}{\eta_{ш}}.$$

$$R_{заз.од} = \frac{27.83}{0.6} = 46.4 \text{ Ом}; \quad R_{ш.з} = \frac{7.272}{0.67} = 10.85 \text{ Ом.}$$

9. Визначаємо опір  $R_{см}$ , з урахуванням паралельного з'єднання штучних заземлювачів  $R_{шт}$  та шини, тобто:

$$R_{ш.з} = \frac{R_{см} \cdot R_{шт}}{R_{см} + R_{шт}}, \text{ звідки } R_{см} = \frac{R_{ш.з} \cdot R_{шт}}{R_{ш.з} - R_{шт}}.$$

Згідно початкових даних, маємо:

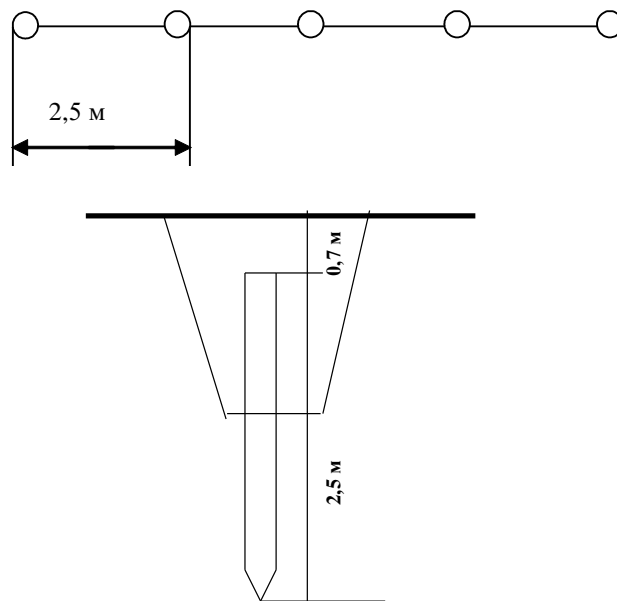
$$R_{см} = \frac{10,85 \cdot 5,45}{10,5 - 5,45} = \frac{59,13}{5,4} = 10,95 \text{ Ом.}$$

10. Визначається (уточнюється) кількість вертикальних заземлювачів за формулою:

$$n = \frac{R_{\text{заз.од}}}{R_{\text{ст}}} = \frac{46.4}{10.95} = 4.23, \text{ тобто приймаємо кінцеву кількість вертикальних}$$

електродів  $n = 5$  шт.

Схема розміщення вертикальних заземлювачів може прийняти вигляд *Рис. А.1.*



*Рисунок А.1 – Схема розташування вертикальних заземлювачі*