

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

«___» _____ 2024 р.

ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА за другим (магістерським) рівнем вищої освіти

на тему

**«Розробка та дослідження системи автоматичного регулювання
температури на виході барабанного гранулятора-сушарки при
виробництві мінеральних добрив»**

Виконав здобувач II курсу групи АК-23М-1
ОПП «Автоматизація та комп'ютерно-
інтегровані технології»
спеціальності 174 «Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка»

_____ Станіслав ДЯТЛОВ

«___» _____ 2024 р.

Керівник проекту

доцент, канд.техн.наук

_____ Олександр ДІДИК

«___» _____ 2024 р.

Рецензент

_____ Іван САВЕЛЕНКО

«___» _____ 2024 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.

“ ” _____ 2024 року

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

Дятлова Станіслава Олеговича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка та дослідження системи автоматичного регулювання температури на виході барабанного гранулятора-сушарки при виробництві мінеральних добрив

2. Керівник роботи Дідик Олександр Костянтинович, канд. техн. наук, доцент,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту 02.12.2024 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи Розробити та дослідити систему автоматичного регулювання температури на виході барабанного гранулятора-сушарки при виробництві мінеральних добрив 1. Огляд технології виробництва мінеральних добрив; 2. Розробка структурної схеми автоматизації; 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
Охорона праці	Жесан Р.В.		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Огляд технології виробництва мінеральних добрив</i>	<i>15.10.24</i>	
2.	<i>Розробка структурної схеми автоматизації</i>	<i>30.10.24</i>	
3.	<i>Проектування системи автоматичного регулювання</i>	<i>15.11.24</i>	
4.	<i>Практична реалізація системи автоматичного регулювання</i>	<i>30.11.24</i>	

Дата видачі завдання 02.09.2024 р.

Керівник роботи _____ О.К. Дідик «____» _____ 2024 р.

Завдання прийнято до виконання

Здобувач _____ С.О. Дятлов «____» _____ 2024 р.

Анотація

на випускнху кваліфікаційну роботу студента групи АК-23М-1 Дятлова Станіслава Олеговича зі спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» на тему: «Розробка та дослідження системи автоматичного регулювання температури на виході барабанного гранулятора-сушарки при виробництві мінеральних добрив».

Роботу присвячено проблемі стабілізації температури на виході барабанного гранулятора-сушарки при виробництві мінеральних добрив. Для ефективного виробництва гранульованих добрив необхідно відслідковувати їх температуру і вологість. Необхідно ретельно контролювати температуру і не давати їй підніматися вище норми, щоб не викликати процесу розплаву або недостатнього підігріву, тим самим унеможливаючи формування гранул.

В роботі розроблена структурна схема системи автоматичного регулювання та обрані необхідні елементи системи. Проведений синтез оптимальних регуляторів при різних значеннях вагових коефіцієнтів. Методом аналізу одержаних результатів обрано регулятор, який забезпечує найкращу якість функціонування системи. Для обраного регулятора був розроблений алгоритм програмної реалізації та розроблена принципова електрична схема на базі однокристального мікроконтролера з відповідними пристроями вводу та виводу інформації, для підключення датчиків та управлінням виконавчим механізмом.

Ключові слова: стабілізація температури, барабанний гранулятор-сушарка, оптимальний регулятор, система автоматичного регулювання.

Summary

on final qualification work of the student of group AK-23M-1 Stanislav Diatlov on a speciality 174 «Automation, computer-integrated technologies and robotics» on the theme: «Development and research of an automatic temperature control system for the outlet of a drum granulator-dryer in the production of mineral fertilisers».

The work is devoted to the problem of stabilizing the temperature at the outlet of the drum granulator-dryer in the production of mineral fertilizers. For the effective production of granular fertilizers, it is necessary to monitor their temperature and humidity. It is necessary to carefully control the temperature and not let it rise above the norm, so as not to cause the process of melting or insufficient heating, thereby making it impossible to form granules.

The work developed a structural diagram of the automatic control system and selected the necessary elements of the system. The synthesis of optimal regulators at different values of weight coefficients was carried out. By analyzing the results obtained, a regulator was selected that provides the best quality of system operation. For the selected regulator, a software implementation algorithm was developed and a schematic electrical diagram was developed based on a single-chip microcontroller with appropriate input and output devices for connecting sensors and controlling the actuator.

Key words: temperature stabilization, drum granulator-dryer, optimal regulator, automatic control system.

ЗМІСТ

Вступ	2
1 Огляд технології виробництва мінеральних добрив	4
2 Розробка структурної схеми автоматизації	17
2.1 Об'єкт управління	17
2.2 Вибір виконавчого механізму.....	22
2.3 Вибір датчика	24
2.4 Структурна схема системи автоматичного регулювання	26
3 Проектування системи автоматичного регулювання	28
3.1 Синтез системи стабілізації температури на виході барабанного гранулятора-сушарки	28
3.2 Аналіз якості вирішення задачі регулювання.....	35
4 Практична реалізація системи автоматичного регулювання.....	48
4.1 Визначення Z-перетворення передаточної функції регулятора.....	48
4.2 Опис принципової схеми регулятора	49
Висновки.....	51
Список літератури.....	52

Вступ

Актуальність теми. У сучасних умовах ринкової економіки важливим є не лише виробництво гранульованих мінеральних добрив, а й створення умов для отримання продукції високої якості. Це дозволяє довше зберігати її властивості та забезпечувати конкурентоспроможність на ринку мінеральних добрив.

Для ефективного виробництва гранульованих добрив важливо контролювати їх температуру та вологість. Необхідно ретельно слідкувати за температурним режимом, щоб вона не перевищувала встановлені норми, оскільки це може призвести до розплавлення або недостатнього підігріву, що перешкоджатиме формуванню гранул. Таким чином, автоматизація процесу регулювання температури є складним та важливим завданням, успіх якого значною мірою залежить від точності стабілізації температури на виході з барабанного гранулятора-сушарки.

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є покращення якості гранульованих мінеральних добрив шляхом розробки системи стабілізації температури на виході з барабанного гранулятора-сушарки.

Для досягнення поставленої мети дослідження були сформульовані та вирішені такі задачі:

- огляд та аналіз конструкції барабанного гранулятора-сушарки з визначенням шляхів автоматизації процесу;
- розробка структурної схеми системи стабілізації температури на виході з барабанного гранулятора-сушарки та вибір необхідних елементів цієї системи;
- синтез оптимального регулятора для системи стабілізації температури з варіюванням вагового коефіцієнту функціоналу якості;
- реалізація розрахованого оптимального регулятора за допомогою сучасних цифрових апаратних засобів.

Об'єкт дослідження – система стабілізації температури на виході з барабанного гранулятора-сушарки.

Предмет дослідження – методи та алгоритми підвищення точності регулювання температури на виході з барабанного гранулятора-сушарки.

Методи дослідження – засновані на методах сучасної теорії управління, математичної статистики, теорії випадкових функцій та спектрального аналізу.

Наукова новизна одержаних результатів:

- проведений аналіз якості системи стабілізації температури на виході з барабанного гранулятора-сушарки, що дозволив обрати оптимальний регулятор серед усіх розрахованих під час синтезу при різних значеннях вагового коефіцієнту функціоналу якості.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що визначені структури та параметри оптимальних регуляторів дають змогу інженеру-конструктору отримувати рішення задач без необхідності виконувати аналогічні розрахунки.

Апробація результатів досліджень. Основні результати досліджень були представлені на Всеукраїнській науково-практичній on-line конференції «Проблеми енергоефективності та автоматизації в промисловості та сільському господарстві», яка відбулася 13-14 листопада 2024 року.

Публікації. Основні результати досліджень висвітлені в одній науковій публікації.

1 Аналіз технології виробництва мінеральних добрив

Відомо, що основними елементами, які складають рослини та необхідні для їхнього росту, є вуглець, кисень, водень, азот, фосфор, калій, сірка, кальцій, магній і залізо. Листя рослин поглинає діоксид вуглецю з повітря, а коріння — воду, задовольняючи потреби рослин у вуглеці, кисні та воді. Інші елементи рослини засвоюють через коріння у вигляді розчинених мінеральних солей. Потреба рослин у солях, що містять азот, фосфор і калій, вимірюється сотнями мільйонів тонн щорічно, в той час як потреба в солях, що містять інші елементи, значно менша.

Для нормального росту рослинам також потрібні з'єднання бору, міді, молібдену, цинку, кобальту та марганцю, але в дуже малих кількостях. Добрива, що містять ці елементи, називаються мікродобривами. Мінеральні та органічні добрива, які вносяться в ґрунт, забезпечують рослини необхідними живильними речовинами.

Використання мінеральних добрив у сільському господарстві не лише сприяє збільшенню врожайності культур, а й покращує якість сільськогосподарської продукції. Зокрема, зростає вміст білка в злаках, цукру в буряках і винограді, крохмалю в картоплі, а також покращуються властивості волокна бавовника та льону. Це, в свою чергу, підвищує рентабельність сільськогосподарського виробництва та зменшує потребу в робочій силі.

Простими або односторонніми добривами називають мінеральні добрива, що містять лише одну живильну речовину. Комплексними або багатоконпонентними добривами є ті, що містять дві чи більше живильних речовин. Якщо комплексні добрива отримані в результаті хімічних процесів, їх називають складними, а якщо вони створені шляхом механічного змішування простих добрив — змішаними. Добрива, що містять 30% або більше живильних речовин, класифікуються як концентровані.

Добрива можуть бути розчинними у воді, що забезпечує їх добре засвоєння рослинами на різних типах ґрунтів, або нерозчинними у воді. Розчинні фосфорні добрива поділяються на водорозчинні, цитратнорозчинні та лимоннорозчинні. Цитратнорозчинні добрива розчиняються в аміачному розчині цитрату амонія і добре засвоюються рослинами. Лимоннорозчинними добривами є фосфорні добрива, що розчиняються в 2%-ному розчині лимонної кислоти. Вони менш розчинні, тому повільніше діють на рослини, але є більш ефективними на кислих ґрунтах.

Також випускаються добрива повільної дії, які мають штучно знижене розчинення водорозчинних живильних речовин. Це дозволяє уникнути їх швидкого вимивання з ґрунту.

Тверді добрива зазвичай постачаються в гранульованому вигляді (у вигляді окатаних кульок, рідше — у вигляді кристалів). Гранульовані добрива менш схильні до злежування і краще розсіюються, що робить їх зручними для використання.

Нижче, при описі окремих видів мінеральних добрив, будуть наведені їх фізико-хімічні, механічні та товарні властивості, які мають важливе значення для зберігання, транспортування та використання в сільському господарстві. Особливо важливо враховувати гігроскопічність, схильність до злежування, розмір і міцність частинок, фракційний склад та вологоємність.

На сьогодні широко використовуються апарати типу амонізатор-гранулятор, сферодайзер та барабанні грануляційні сушарки (БГС) для одночасного гранулювання і сушки складних добрив, таких як нітрофоска, нітроаммофоска, аммофос та інші.

Амонізатори-гранулятори

Амонізатори-гранулятори широко використовуються у виробництві складних добрив на основі аміаку, фосфорної, поліфосфорної та азотної кислот, а також інших азото- і калійвмісних компонентів. Ці апарати характеризуються високою продуктивністю, а їх конструкція дозволяє

додавати в добриво великі кількості нейтралізуючого аміаку без втрат NH_3 і засвоєного P_2O_5 .

До переваг амонізаторів-грануляторів можна віднести: компактність; можливість поєднання процесів амонізації та гранулювання в одному апараті, що дозволяє зменшити займану виробничу площу, знизити енерговитрати та виключити необхідність у транспортуванні напівфабрикатів між стадіями амонізації та гранулювання; високу інтенсивність процесу гранулювання завдяки наявності спеціальної насадки, що дозволяє зменшити кількість ретурів і покращити якість продукції, зокрема її міцність, гранулометричний склад та інші характеристики. Поєднання цих стадій в одному апараті спрощує процес, зменшує потребу в додатковому обладнанні та дає можливість використовувати теплоту реакції нейтралізації для сушки продукту.

Досвід експлуатації промислових установок, що використовують амонізатори-гранулятори на стадії гранулювання, показав їх високу стабільність у роботі, простоту в управлінні та здатність виробляти широкий асортимент добрив з різним співвідношенням і вмістом живильних речовин. Амонізатори-гранулятори можуть відрізнятися не тільки розмірами, а й конструкцією внутрішньої частини апарату. Для гранулювання складнозмішаних добрив часто застосовують амонізатор-гранулятор з певною конструкцією, зображеною на малюнку.

Аміак, розчини та плави подаються в апарат через трубопроводи. Рідкий аміак надходить в апарат з боку входу і виходу суміші, проходячи під шар гранульованої маси. На вході розташовано чотири трубки, на виході — п'ять. Амміакопровід жорстко закріплений щодо осі амонізатора-гранулятора. Кут нахилу розподільних труб можна регулювати за допомогою обертових пристроїв, що розміщені в торцях барабана. Плав аміачної селітри подається з вхідного боку через трубу з восьмима форсунками, а для розпилювання плава використовується пара. Через кожні 15—20 хвилин роботи форсунки продуваються парою, для чого передбачено спеціальний паропровід. Розчин фосфату амонія вводиться на відстані $\frac{2}{3}$ довжини барабана від виходу шихти через вісім розпилюючих форсунок.

Повітря подається через спеціально орієнтовані розподільні трубки. Тверді компоненти безперервно подаються в процес гранулювання через завантажувальну лійку 2. Продуктивність амонізатора-гранулятора регулюється швидкістю стрічки завантажувального транспортера, інтенсивністю подачі твердих компонентів і витратою рідких та газоподібних компонентів суміші. Барабан має невеликий нахил ($1,8^\circ$).

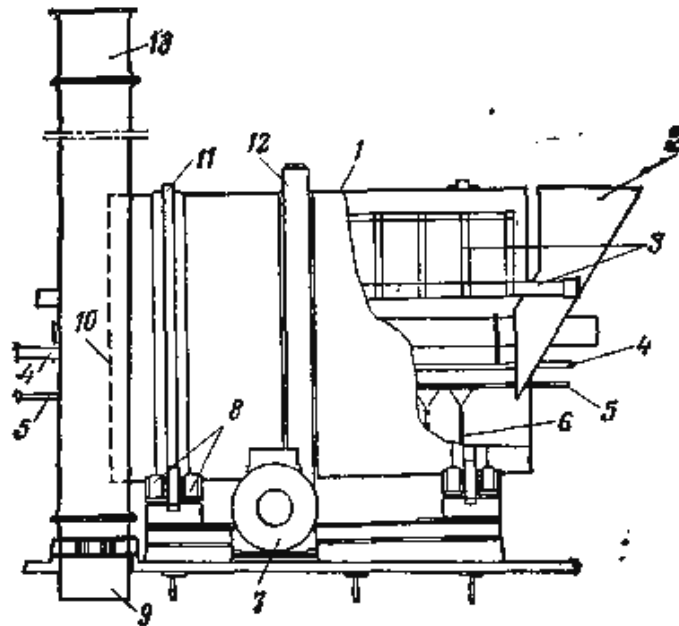


Рисунок 1.1 – Аммонізатор-гранулятор

- 1 — корпус; 2 — лійка для завантаження сипких компонентів;
- 3 — щітка для очищення внутрішніх стінок; 4 — трубопроводи для подачі рідких компонентів;
- 5 — аміакопровід; 6 — форсунки для подачі аміаку;
- 7 — привід; 8 — опорні та несучі ролики; 9 — лійка для вологих гранул;
- 10 — підпірне кільце; 11 — обв'язка;
- 12 — зубчасте колесо; 13 — газопровід.

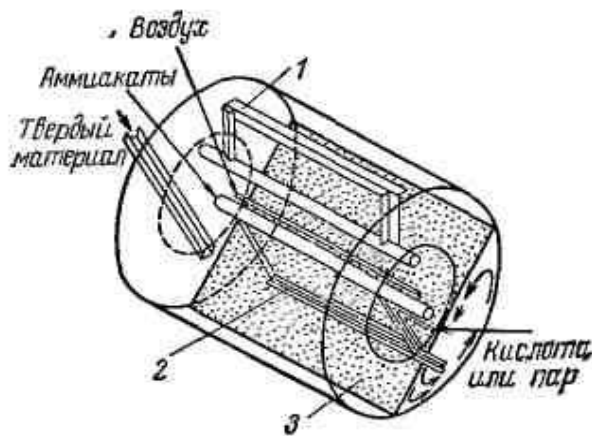


Рисунок 1.2 – Амонізатор-гранулятор безперервної дії

1 — очищувальний скребок; 2 — розподільник кислоти або пари; 3 — шар матеріалу, що підлягає амонізації.

Основними відмінними характеристиками є трубчасті розподільники з численними отворами для подачі рідин, газоподібного аміаку або пари під поверхню шару обертових твердих частинок, а також скребок, який очищає внутрішню поверхню барабана. Конструкції таких барабанів можуть бути різними: деякі включають лише секцію амонізації, де утворюються зародкові агломерати, інші мають додаткову секцію з гладкою внутрішньою поверхнею, в якій первинні агломерати частинок перетворюються на міцні гранули в результаті їх ущільнення під впливом обдування.

Амонізатор-гранулятор також може бути виконаний у вигляді відкритого барабана з підпірними кільцями на кінцях і в середині, які розділяють барабан на дві секції: амонізації та гранулювання. Одне з підпірних кілець використовується для запобігання розсипу матеріалу, а інше — для підтримки певної глибини шару.

До внутрішньої поверхні барабана замість звичайних підйомних лопатей кріпляться подовжньо орієнтовані ребра 9. Висота ребра (зазвичай 20—40 мм) забезпечує необхідне перемішування та переміщення гранульованої суміші (у нижній частині барабана залишається лише тонкий нерухомий шар) і, крім того, забезпечує нормальну роботу роторів.

У кожній секції встановлено два ротори, які обертаються паралельно осі барабана: один для перемішування маси, інший для очищення стінок. Ротори закріплені в барабані за допомогою опорних та сполучних елементів, які фіксуються до осі металевої труби, підтримуваної рамою. Ротори складаються з металевих дисків і валів, надійно з'єднаних з цими дисками, а також радіально розташованих планок, що входять у пази дисків.

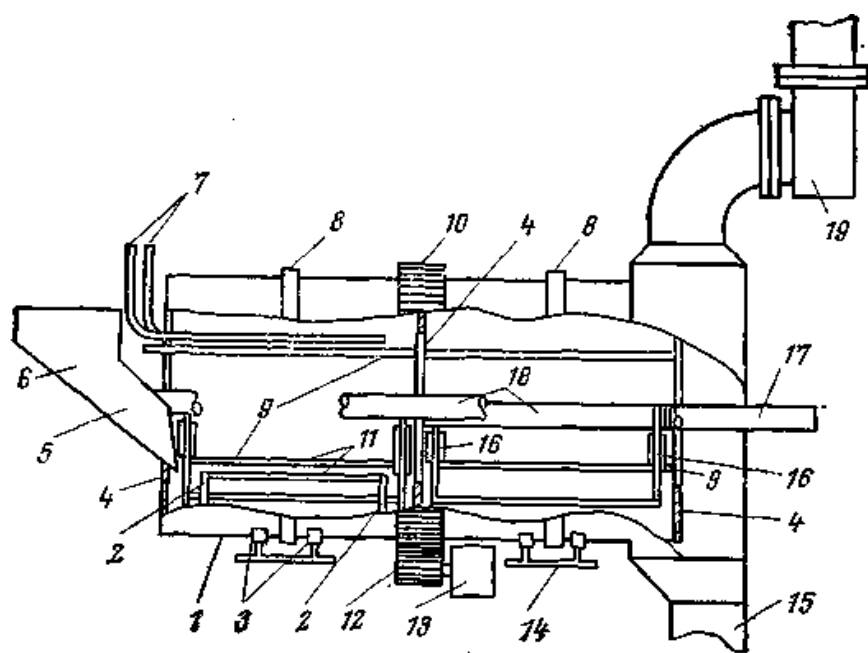


Рисунок 1.3 - Амонізатор-гранулятор з секціями амонізації та гранулювання

- 1 — корпус; 2 — металеві диски; 3 — підшипникові опори; 4 — підпирні кільця; 5 — завантажувальна тічка для початкових компонентів;
- 6 — завантажувальний люк; 7 — трубопроводи для подачі аміаку, розчинів, кислот і води; 8 — бандажі; 9 — подовжньо орієнтовані ребра;
- 10 — прямозубе колесо; 11 — ротори для перемішування гранульованої суміші і очищення стінок; 12 — редуктор;
- 13 — електричний мотор; 14 — опора; 15 — тічка для виходу вологих гранул;
- 16 — опорні сполучні елементи; 17 — металева труба для кріплення сполучних елементів; 18 — вали; 19 — газохід.

Ротори обертаються в підшипникових опорах. Розміри ротора для очищення можуть варіюватися, але зазвичай його діаметр коливається в межах від 200 до 500 мм, а довжина відповідає довжині грануляційної установки. Аміак, розчини та вода подаються через трубопроводи, які направляються в грануляційний шар.

У процесі гранулювання тверді компоненти постійно подаються в барабан через завантажувальний люк за допомогою транспортера.

Барабан має незначний нахил, який залежить від висоти підпирних коліс, довжини барабана, швидкості його обертання та інших факторів. Серед переваг цієї конструкції — висока інтенсивність процесу, що визначається ефективністю роботи роторів для перемішування та очищення.

Сферодайзери

Гранулювання та сушка в сферодайзерах (рис. 1.4). У цьому випадку процеси гранулювання та сушки продукту здійснюються в одному апараті. Аммонізована пульпа, попередньо змішана з хлористим калієм, подається насосом і розпилюється пневмофорсунками безпосередньо в передню частину апарату. Всередині барабана під час його роботи утворюється щільна завіса гранульованого продукту, який повертається через живильник, а також матеріал, що знаходиться в сферодайзері.

При обертанні барабана матеріал захоплюється лопатками, закріпленими на внутрішніх стінках апарату, і піднімається вгору. Досягнувши певної висоти, частинки починають повільно падати вниз, утворюючи щільну завісу. Частина оброблюваного матеріалу повертається в передню частину апарату, що дозволяє підтримувати оптимальні умови для формування гранул та зменшує необхідність у зовнішньому ретурі. Такий режим руху частинок забезпечується раціональною конструкцією лопаток та їх правильним розташуванням.

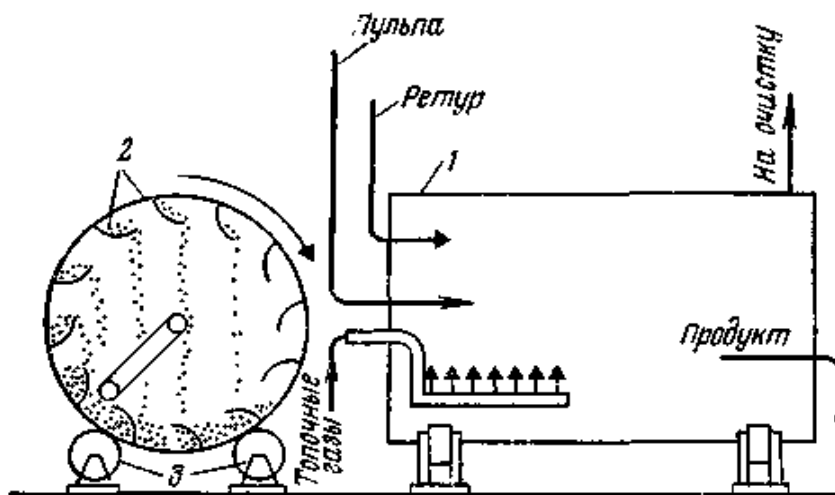


Рисунок 1.4. - Сферодайзер

1 — корпус; 2 — лопатки; 3 — роликові станини.

Апарати типу сферодайзера широко використовуються для процесів гранулювання та сушки мінеральних добрив. Їх конструкція, розміри, внутрішнє наповнення барабана, а також вузли для подачі пульпи та ретура можуть варіюватися. Наприклад, сферодайзер може бути барабаном (діаметр $D = 1,8$ м, довжина $L = 7,6$ м), що обертається, з підпірними кільцями на кінцях. Він може мати одну або кілька завантажувальних воронок для ретура, систему для розпилення пульпи під тиском повітря $(2,8—7) \cdot 10^5$ Н/м² ($2,8—7$ кгс/см²), розподільні лопаті завдовжки 1,2—1,9 м для завантаженого матеріалу, нахилені до подовжньої осі гранулятора, а також подовжні підйомні лопаті, приварені до корпусу барабана. Кінці барабана входять в нерухомі коробки: завантажувальний кінець підключений до коробки для гарячого газу або повітря, що поступає при температурі 150—325 °С, а розвантажувальний — до коробки для відхідного газу (100—120 °С), який вентилятор подає в циклон. Гранулятор встановлюється під нахилом 5°.

Барабанні гранулятори-сушарки (БГС)

Основні переваги цього апарату:

- Можливість гранулювання при невеликій кратності ретура (1—2 т на 1 т продукту).
- Простота технологічної схеми та управління процесом.

- Можливість переробки пульп з різним вмістом води та отримання гранульованого продукту з заданим розміром гранул у вузькому діапазоні.

- Висока якість гранульованого продукту.

- Можливість високого рівня автоматизації процесу.

- Висока ефективність та економічність процесу.

Недоліки:

- Значне налипання продукту на внутрішні стінки барабана, що призводить до частих зупинок для очищення.

- Можливість утворення вибухонебезпечних сумішей при високому ступені амонізації пульп.

- Складнощі при гранулюванні продуктів, що розкладаються або плавляться при температурах понад 300 °С, а також добрив з підвищеним вмістом азоту.

Процес гранулоперетворення в апаратах типу сферодайзер та БГС протікає наступним чином: пульпа з вмістом води до 40% подається пневматичними форсунками на щільну завісу гранульованого матеріалу. Цей матеріал може бути «зовнішнім» ретуром, що надходить в апарат типу сферодайзер, або «внутрішнім» ретуром з невеликою кількістю «зовнішнього» — в апарат БГС. Краплі пульпи та гранули, покриті пульпою, омиваються топковими газами з усіх боків, що сприяє швидкому випаровуванню вологи з поверхні частинок, запобігаючи їх злипанню. Під впливом цього процесу гранули укрупнюються, набувають сферичної форми, а потім відбувається подальше видалення вологи з внутрішніх шарів частинок із одночасним обдуванням та ущільненням гранул.

Завдяки значній площі поверхні контакту між гранулами і топковими газами, а також достатньому рівню рушійної сили процесу (різниця тиску пари на поверхні матеріалу та парціального тиску пари в повітрі), створюються оптимальні умови для тепло- та масообміну. Це забезпечує більш інтенсивне видалення вологи з матеріалу порівняно з іншими ретурними процесами у виробництві комплексних добрив.

На процес гранулювання в апаратах типу сферодайзер і БГС значний вплив мають фізико-хімічні властивості гранульованої пульпи (в'язкість, вміст води та ін.), а також характеристики розпилю. Серед них важливими є геометрія факела розпилю, дисперсність, щільність зрошування та рівномірність розподілу пульпи по перетину факела. Крім того, важливими факторами є кратність ретура, якість завіси гранульованого матеріалу і температура топкових газів. Ці фактори визначають ефективність гранулювання та сушіння, а також впливають на якість отриманого гранульованого продукту.

Останніми роками процес виробництва складних добрив із використанням апарата типу БГС для одночасного гранулювання і сушки набув широкого поширення. Цей метод є малоретурним, ефективнішим та економічнішим порівняно з аналогічними технологіями, де гранулювання здійснюється в шнеку-змішувачі або амонізаторі-грануляторі. У разі використання БГС кількість ретура при поєднанні сушки та гранулювання складає лише 1,5–2 т на 1 т продукції, тоді як в інших технологіях (шнекових змішувачах або амонізаторах-грануляторах) цей показник може досягати 6 т на 1 т продукту.

Перехід виробництва з випуску однієї марки добрива на іншу не викликає значних труднощів і здійснюється шляхом коригування співвідношень кількості сировини, а також додавання або заміни компонентів. У кожному конкретному випадку встановлюється відповідний режим гранулювання, який визначає продуктивність агрегату та витратні коефіцієнти для досягнення бажаних характеристик кінцевого продукту.

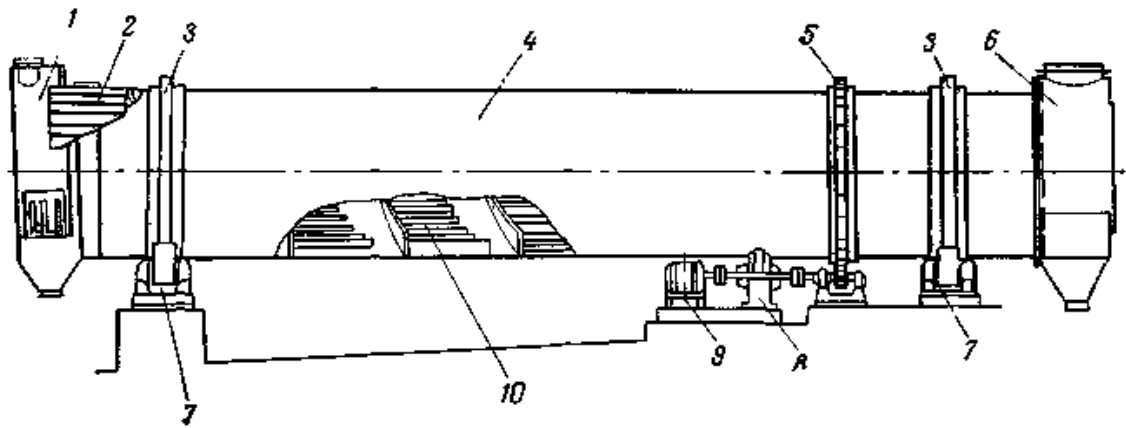


Рисунок 1.5 – Барабанний гранулятор-сушарка (БГС):

1 — камера подачі топкових газів; 2 — лопатки передньої частини апарату; 3 — бандажі; 4 — корпус; 5 — зубчастий вінець; 6 — камера вивантаження; 7 — роликові опори; 8 — редуктор; 9 — електродвигун; 10 — зворотний шнек.

Обертальний барабан, передня частина якого довжиною 0,5 м оснащена лопатками, розташованими паралельно осі барабана, призначеними для переміщення гранул та ретур з нижньої частини апарату вгору. Така конструкція дозволяє утворити щільну завісу частинок перед форсунками. Для підтримки необхідної висоти шару гранул в зоні розпилювання пульпи, забезпечення оптимальної тривалості перебування продукту в грануляторі (35-40 хвилин) і поліпшення процесу обдування гранул всередині барабана встановлено зворотний шнек (крок 2,2 м). На барабані закріплені бандажі, на яких він спирається на дві роликові станини. Для запобігання осьовим зсувам барабана на передній станині встановлені опорні ролики. Привід барабана здійснюється від електродвигуна через редуктор, зубчатий вінцевий шестерневий механізм і зубчатий вінець, закріплений на барабані. Для розпилювання пульпи в завантажувальній камері встановлені дві форсунки типу ФН-10, одна з яких є резервною.

Сушка вологих гранул здійснюється за допомогою топкових газів, які проходять через барабан за допомогою димососа і, після очищення в батареї циклонів, викидаються в атмосферу. Вивантаження готового продукту

відбувається безперервно через нижній люк вивантажувальної камери, а з діаметрально протилежного штуцера відбираються гріючі гази. На зовнішній поверхні барабана встановлені молотки, які при його обертанні завдяки ударам по поверхні руйнують шар матеріалу, що налипає на внутрішню стінку барабана.

Процес гранулювання регулюється за кількома параметрами: гранулометричним складом добрив (за допомогою зміни подачі ретура або пульпи), вмістом вологи в готовому продукті (коригуванням температури вхідних топкових газів або зміною навантаження на пульпу шляхом регулювання її тиску перед форсункою), а також продуктивністю (збільшенням або зменшенням температури та об'єму топкових газів, коригуванням навантаження на пульпу, концентрації пульпи та кратності ретура).

Основними неполадками роботи цього апарату є: збільшення виходу крупної фракції через зменшення подачі ретура або тиску стисненого повітря перед форсункою, а також підвищений вихід дрібної фракції внаслідок збільшення кратності ретура або тиску повітря перед форсункою.

У конструкції апарату барабан може бути горизонтальним, що обертається, з двостінним корпусом, що складається з внутрішньої та зовнішньої циліндричних оболонок. Переміщення матеріалу всередині барабана здійснюється за допомогою шнека, розташованого на внутрішній поверхні корпусу. Усередині барабана встановлена підйомна насадка, яка складається з стрижнів, розташованих уздовж внутрішньої оболонки. Ці стрижні розміщені по колу з рівномірними інтервалами. Матеріал піднімається цією насадкою, а потім падає вниз у вигляді завіси, на яку пневматична форсунка, розташована всередині барабана паралельно його осі, напилує рідину. На розвантажувальному кінці барабана в його внутрішній оболонці зроблені отвори, через які дрібні частинки просіваються в кільцевий простір між двома оболонками. Тут встановлений зворотний шнек, який переміщає дрібницю назад до завантажувальної частини барабана, де

внутрішня оболонка має отвір для повернення дрібниць назад всередину барабана.

Завдяки такій конструкції гранулювання матеріалу, розсівання продукту та подача дрібниці назад у барабан виконуються в одному апараті. Це дозволяє уникнути використання грохотів та транспортних пристроїв для відділення дрібних часток і їх подачі назад у гранулятор.

Барабан поділений на три основні зони: перша — для сушки та гранулювання, друга — для попередньої класифікації, і третя — для охолодження продукту. У центральній частині барабана розміщені гвинтові лопаті, перша зона оснащена зворотним закритим шнеком і лопатевою насадкою, а третя — секторною насадкою та центральною трубою, що також має зворотний закритий шнек. Труба використовується для відведення відпрацьованих газів, а шнек — для подачі ретур до зони сушки. Зона охолодження завершується ґратами, через які відсіюється крупна фракція. На місцях з'єднання цих елементів з барабаном встановлені стрічкові ущільнення.

Пульпа з вологістю до 20% подається в форсунки, де вона розпилюється в потік сушильного агента, що надходить при температурі 400—450 °С. Під час обертання барабана дрібний продукт — ретур, що знаходиться на лопатках, зсипається і утворює завісу. Розпилена пульпа осідає на частинки цієї завіси, що сприяє їх укрупненню. Потім частинки сушаться і обливаються, формуючи гранули. Далі гранульований продукт класифікується: дрібні частинки відокремлюються від готових гранул, які направляються на охолодження, після чого за допомогою зворотного шнека подаються назад у головну частину барабана для утворення нової завіси.

Основним завданням цієї бакалаврської роботи є стабілізація температури на виході з БГС при виробництві мінеральних добрив. Регулювання температури топкових газів здійснюється через контроль витрати палива, що подається в топку. Метою є розробка автоматизованої системи керування температурою димових газів в апараті БГС.

2 Розробка схеми автоматизованої системи управління

У даній роботі об'єктом управління є гранули мінеральних добрив, що виготовляються в барабанному грануляторі-сушарці. Для підтримання необхідної температури потрібно регулювати потік газу, що подається в топку. Для вимірювання температури вибирається термопара, яка забезпечує точні показання температури по всьому об'єму гранул, оскільки температура на виході з апарату може варіюватися. Для підтримки стабільної температури гранул ми будемо регулювати потік газу за допомогою клапана, що дозволить вирівняти температуру в межах заданих параметрів.

2.1 Об'єкт управління

Барабанні гранулятори-сушарки типу БГС представляють собою обертовий барабан 1, встановлений під кутом 1-3° на двох опорних станціях 2. Для запобігання осьовому зрушенню барабана використовуються опорні ролики 5. Внутрішня поверхня барабана оснащена короткою насадкою 12, а на решті його частини встановлена підйомно-лопатева насадка 8. У БГС-апаратах використовуються лопатки Г-подібної форми, а також зворотний шнек 7, який транспортує ретур від конуса 14 в зону пульпи. У торцевих частинах обертового барабана знаходяться завантажувальна камера 9 з форсунками 10 та патрубками 11 для подачі теплоносія, а також розвантажувальна камера 7 з штуцерами для відведення готового продукту. Обертання барабана здійснюється від електродвигуна 4 через редуктор 5, шестерню 6 і зубчатий вінець 18, який кріпиться до барабана за допомогою черевиків.

Принцип роботи грануляторів-сушарок полягає в тому, що під час обертання барабана підйомно-лопатева насадка 12 забезпечує рух матеріалу. На цей потік матеріалу пульпа гранульованої речовини розпилюється за допомогою пневматичної форсунки 10. В апараті БГС у зоні вивантаження розташований класифікатор 14, який виконаний у вигляді конуса.

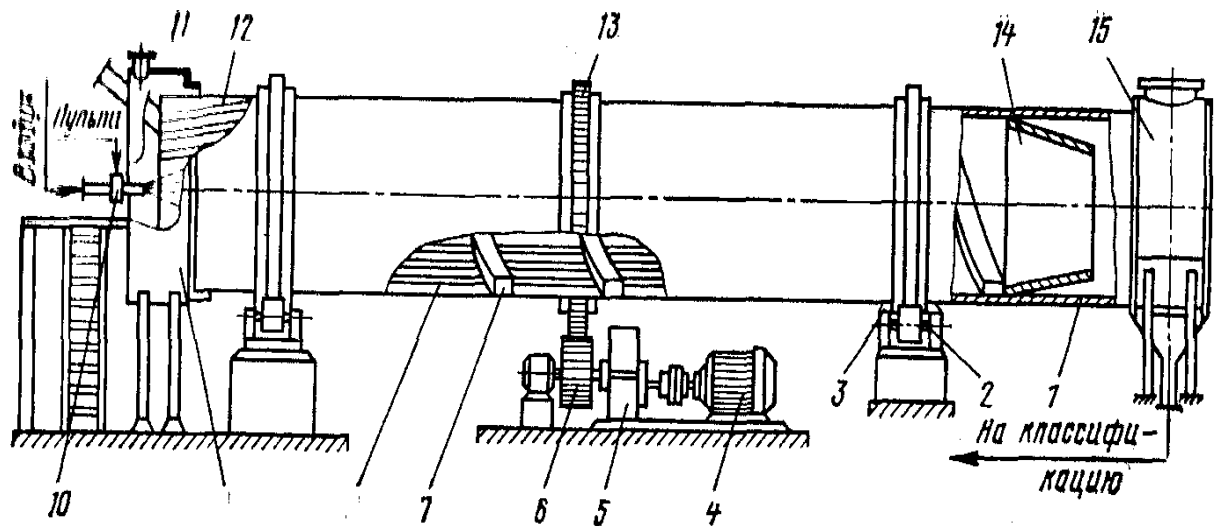


Рисунок 2.1 - Схематичне зображення барабанного гранулятора-сушарки.

Основні переваги цього апарату включають:

- можливість гранулювання при низькій кратності ретура (1–2 т на 1 т продукту);
- простота технологічної схеми та управління процесом;
- здатність обробляти пульпи з різним вмістом води та отримувати гранульований продукт з точно заданим розміром гранул у вузькому діапазоні;
- висока якість гранульованої продукції;
- потенціал для значного ступеня автоматизації процесу;
- висока ефективність та економічність процесу.

Серед недоліків цього апарату можна виділити:

- значне налипання продукту на внутрішні стінки барабана, що часто призводить до необхідності зупинок для чищення;
- можливість утворення вибухонебезпечних сумішей при високому рівні аммонізації пульп, що обробляються;

- труднощі при гранулюванні продуктів, що розкладаються або плавляться при температурах понад 300°C, а також добрив з високим вмістом азоту.

До основних проблем у роботі апарату можна віднести:

- збільшення виходу крупної фракції через зменшення подачі ретура або тиск стислого повітря перед форсункою;
- підвищений вихід дрібної фракції через збільшення кратності ретура або тиск повітря перед форсункою.

Ефективність роботи апаратів БГС залежить від таких факторів, як густина матеріалу в зоні розпилення пульпи, характеристики роботи розпилювальних форсунок, швидкість теплоносія та інших параметрів. Температура на виході барабанного гранулятора-сушарки регулюється за допомогою подачі топкових газів.

У цьому розділі представлений розрахунок апарату БГС, зокрема, розрахунок теплового балансу на етапі нейтралізації.

Таблиця 2.2 – Розрахункові дані

Склад полифосфата амония	
%N	14
%P ₂ O ₅	62
концентрація термічної поліфосфатної кислоти %P ₂ O ₅	75
газоподібного аміаку, %NH ₃	100
Витрати на отримання 1т полифосфата аммонія, кг	
кислоти G _к	827
аміаку G _а	173
Температура, °C	
кислоти, яка надходить в процес t _к	80
плаву, який надходить в гранулятор t _п	190
відходящих газів	190

Теплоємність, кДж/(кг*К)	
поліфосфатної кислоти c_K	1,64
поліфосфатного амонію при 192 ⁰ С c_{Π}	1,87
Аміаку c_A	
при 30 ⁰ С	2,16
при 150 ⁰ С	2,32
Тепловий ефект реакції нейтралізації поліфосфатної кислоти аміаком q , кДж/кг	6700
Кількість аміаку, який виділяється з реакції на 1 т g_a , кг	17,3

Втрати тепла в навколишнє середовище вважаються рівними 5% від загальної кількості поданої теплоти.

Кількість теплоти, що припадає на 1 тону готового продукту, розраховується за допомогою рівняння

$$Q = Gct \quad (2.1)$$

де G — маса компонента, c — теплоємність, t — температура.

Прихід тепла

Кількість тепла, що вноситься кислотою:

$$Q_1 = G_K c_K t = 827 * 1.64 * 80 = 108502 \text{ кДж}$$

Кількість тепла, що вноситься аміаком:

$$Q_2 = G_A c_A t_A = 173 * 2.16 * 30 = 11210 \text{ кДж}$$

Кількість тепла, що виділяється під час нейтралізації поліфосфорної кислоти:

$$Q_3 = G_A q = 173 * 6700 = 1159100 \text{ кДж}$$

Загальна кількість теплоти, що надходить:

$$Q_{\Pi} = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 108502 + 11210 + 1159100 = 1278813 \text{ кДж}$$

Витрати тепла

Кількість тепла, яке поглинається припливними газами

$$Q'_1 = g_A c_A t_A = 17.3 * 32 * 190 = 7626 \text{ кДж}$$

Кількість тепла, яке поглинається плавом

$$Q'_2 = G_{II} c_{II} t_{II} = 1000 * 1.87 * 190 = 355300 \text{ кДж}$$

Теплові втрати в оточуюче середовище

$$Q'_3 = 0.05 Q_{II} = 0.05 * 1278813 = 69961 \text{ кДж}$$

Загальна кількість витраченого тепла

$$Q_P = Q'_1 + Q'_2 + Q'_3 = 7626 + 355300 + 69961 = 432887 \text{ кДж}$$

Виконуємо розрахунок для визначення об'єму димових газів, необхідних для сушки амофосу.

З рівняння теплового балансу визначаємо кількість димових газів, необхідних для сушки 1 тонни готового продукту: $V=427,2 \text{ м}^3/\text{т}$

$$Q_{BX} = Q_{\Gamma} + Q_M$$

$$Q_{BHX} = Q_{BHX}(V) + Q_M$$

$$V = 427.2 \text{ м}^3 / \text{т}$$

$$Q_{\Gamma}(V) = 461.6V$$

$$Q_{M_{BX}} = 540009$$

$$Q_{BHX}(V) = 202.5V$$

$$Q_{\Gamma}(V) + Q_{M_{BX}} = Q_{BHX}(V) + Q_{M_{BHX}}$$

$$Q_{M_{BHX}} = Q_{M_{BX}} + Q_{\Gamma}(V) - Q_{BHX}(V)$$

$$Q_{M_{BHX}} = 540009 + 461.6V - 202.5V$$

$$Q_{M_{BHX}} = 540009 + 259.1V$$

$$Q_{\Gamma} = F(V)$$

Як зазначено в літературних джерелах [7], спрощена передатна функція БГС представлена у формі аперіодичної ланки другого порядку:

$$W(p) = \frac{k}{T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2)s + 1} \quad (2.2)$$

Підставляючи параметри використовуваного БГС [7], [9], отримуємо таку передатну функцію об'єкта регулювання:

$$W(p) = \frac{0.18}{0.18s^2 + 1.62s + 1}$$

2.2 Визначення виконавчого механізму

Газові клапани ВН6М-1к з електромагнітним приводом призначені для регулювання та перекриття подачі природного газу в системах газопостачання, газових пальниках та іншому обладнанні, що використовує або споживає газ.

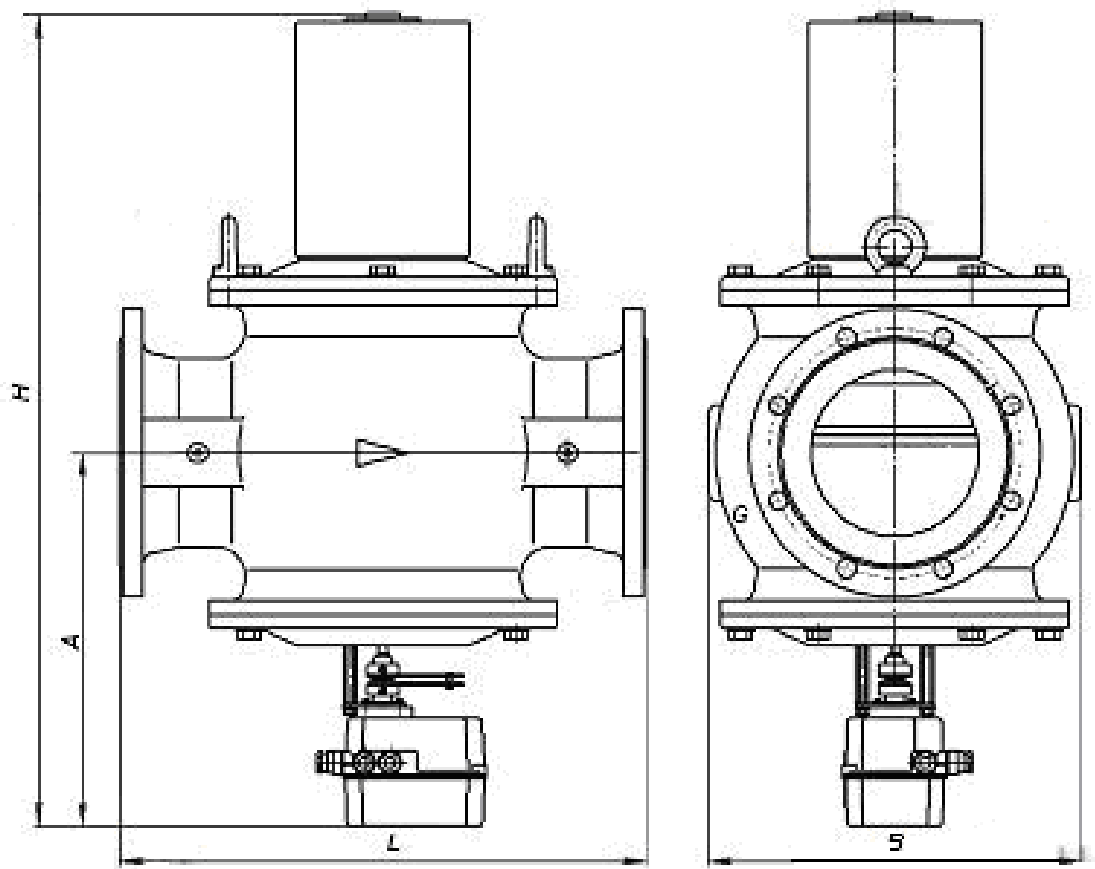


Рисунок 2.2 - Електромагнітний клапан ВН6М-1к

Основні технічні характеристики та габаритні розміри:

Максимальний робочий тиск (P_{max}): 0,3 МПа.

Частота спрацьовувань: до 100 циклів на годину.

Кліматичне виконання: УЗ.1 (температурний діапазон від -30 до +40 °С).

Ступінь захисту: IP65.

Ресурс роботи: 500 000 циклів включення.

Матеріал корпусу: чавун або сталь.

Монтажна позиція: на горизонтальному трубопроводі, котушка спрямована вгору.

Кут повороту регулятора: 90°.

Час повного переміщення регулятора: 25 секунд.

Напруга живлення датчика положення: від 12 до 24 В.

Тип датчика: індуктивний (вихідний ключ датчика активується при спрацьовуванні клапана).

Таблиця 2.1 Параметри клапана ВН6М-1К

Найменування клапана	ВН6М-1К
Діаметр, мм	150
Діапазон робочого тиску, МПа	0-0,1
Розміри, мм	
L	470
B	330
H	718(815)
A	325
Номінальна потужність, Вт	80
Маса, кг	111
Коефіцієнт опору, ξ	10

Як зазначено в літературних джерелах [7], спрощена передатна функція виконавчого органу описується як аперіодична ланка другого порядку:

$$W(p) = \frac{k}{T_1 T_2 p^2 + (T_1 + T_2)p + 1} \quad (2.3)$$

де T_1 — електромагнітна постійна часу клапана;

T_2 — електромеханічна постійна часу клапана.

Після підставлення параметричних даних клапана [7] отримуємо наступну передаточну функцію виконавчого органу:

$$W_{BM}(p) = \frac{0.012}{0.255 \cdot p^2 + 1.85 \cdot p + 1}$$

2.3 Визначення датчика

Одним з найпростіших та найпоширеніших методів вимірювання температури є визначення теплового розширення різних матеріалів. Цей принцип покладений в основу роботи всіх рідинних скляних термометрів. В електричних перетворювачах використовуються інші принципи детектування. Сьогодні широко застосовуються такі типи температурних датчиків: резистивні, термоелектричні, напівпровідникові, оптичні та п'єзоелектричні детектори.

Вимірювання температури завжди передбачає передачу невеликої кількості теплової енергії від об'єкта до датчика, який має перетворити цю енергію в електричний сигнал. Коли контактний детектор (зонд) встановлюється всередину об'єкта або на його поверхню, між об'єктом і зондом відбувається передача тепла через теплопровідність. В результаті чутливий елемент зонда або нагрівається, або охолоджується. Те саме відбувається при передачі тепла через випромінювання: тепла енергія у вигляді ІЧ-випромінювання поглинається датчиком або виділяється ним, в

залежності від температури об'єкта і типу оптичного зв'язку. Будь-який датчик, незалежно від розміру, впливає на зону вимірювання, що може призвести до помилок в визначенні температури. Це стосується всіх методів детектування: радіаційних, конвективних та теплопровідних. Тому розробник повинен прагнути мінімізувати похибки вимірювань, обираючи відповідні конструкції датчиків і методи компенсації помилок.

Існує два основні методи вимірювання температури: рівноважний і прогностичний. У рівноважному методі вимірювання здійснюється, коли між вимірюваною поверхнею та чутливим елементом зонда встановлюється теплове рівновагу, тобто різниця температур між датчиком і об'єктом вимірювання незначна. У прогностичному методі теплова рівновага не досягається, і значення поточної температури визначається за швидкістю зміни температури датчика.

Обираємо термопару типу ТХК згідно з літературними джерелами [5].

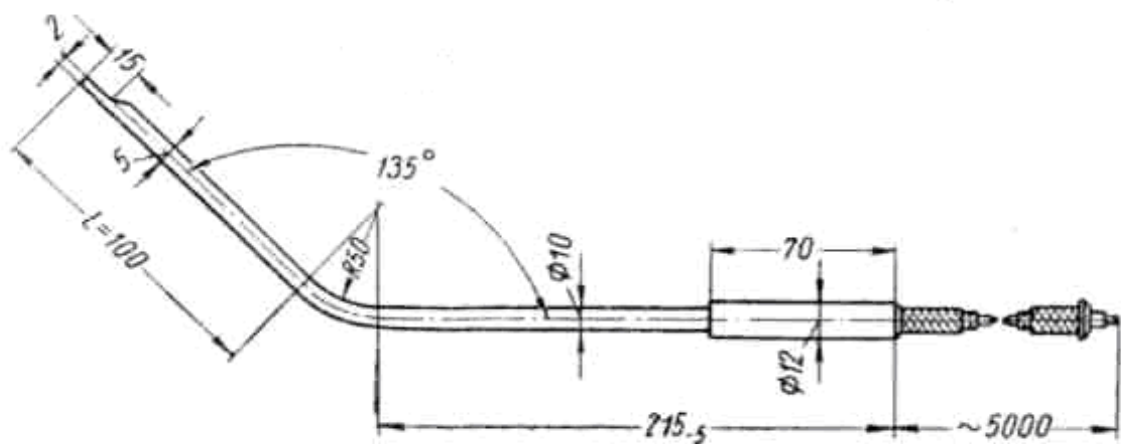


Рисунок 2.3 - Схема термопары типа ТХК

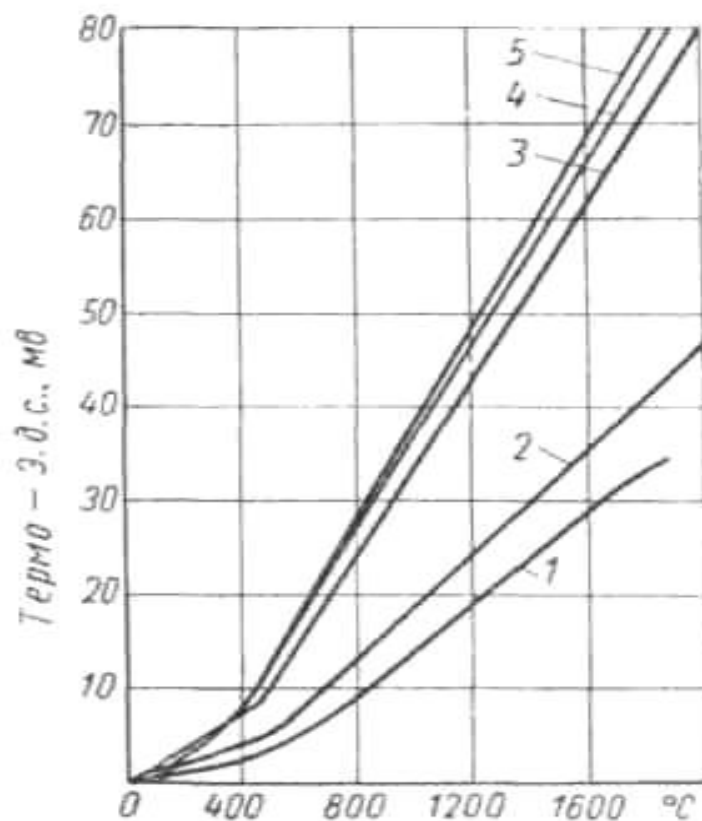


Рисунок 2.4 - Залежність термо-Е. Д. С. від температури для деяких напівпровідникових термопар:
 1-W/(графіт); 2-MoSi₂/(В-С);
 3-TiC/(В-С); 4-ZrB₂/В-С;
 5-TiB₂/(В-с).

2.4 Схема структури системи автоматичного регулювання

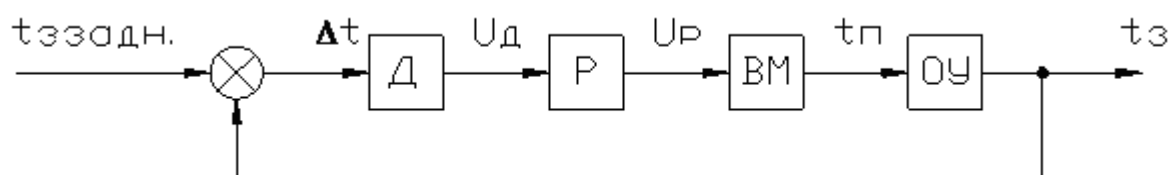


Рисунок 2.5 - Структурна схема САР:

Д – детектор;

Р – регулятор;

ВМ – виконавчий орган;

ОУ – керований об'єкт.

Як показано на рис. 2.8, температура гранул у БГС вимірюється за допомогою датчиків, ми використовуємо термопари типу ТХК. Сигнал з термопар передається в блок перетворення сигналів, а потім на цифровий регулятор через паралельний порт RS-485, який генерує керуючий сигнал для виконавчого механізму — клапана. Клапан безпосередньо впливає на об'єкт управління, регулюючи температуру шляхом зміни положення заслонки.

З наведених вище даних передатні функції мають наступний вигляд:

- датчика

$$W_d(p) = 0,066 \quad (2.4)$$

- органу управління

$$W_{BM}(p) = \frac{0.012}{0.255 \cdot p^2 + 1.85 \cdot p + 1} \quad (2.5)$$

- керованого об'єкта

$$W_{OY}(p) = \frac{0.18}{0.18p^2 + 1.62p + 1} \quad (2.6)$$

3 Розробка системи автоматичного регулювання

3.1 Розробка системи стабілізації температури на виході барабанного гранулятора-сушарки

Аналізуючи структурну схему системи автоматичного регулювання, наведену в розділі 2, можна перетворити її на систему стабілізації, якщо привести структуру до форми, зображеної на рисунку 3.1.

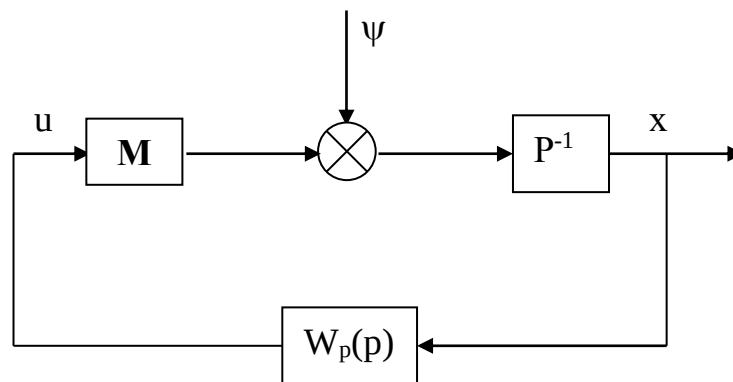


Рисунок 3.1 – Схема структури системи стабілізації

У цьому випадку рух об'єкта можна описати лінійним диференціальним рівнянням з постійними коефіцієнтами

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

Тут $x(t)$ — координата об'єкта; $u(t)$ — координата регулятора (управлінський вплив); $\psi(t)$ — зовнішнє збурення, яке вважається стаціонарним випадковим процесом з нульовим математичним очікуванням і відомою спектральною щільністю.

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

$P(p)$ та $M(p)$ — операторні поліноми від $p = d/dt$.

Потрібно визначити закон управління в системі зворотного зв'язку (знайти диференціальне рівняння, яке пов'язує u та x), щоб замкнута система "об'єкт + регулятор" була стійкою та оптимальною для досягнення мінімуму квадратичного функціоналу.

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

де r та c — вагові коефіцієнти, а $\langle x^2 \rangle, \langle u^2 \rangle$ — дисперсії величин x та u .

Потрібно визначити рівняння для регулятора

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

(Операторні поліноми $W_0(p)$ та $\tilde{W}(p)$), щоб функціонал досягав мінімуму серед класу стійких замкнутих систем "об'єкт + регулятор".

Рівняння регулятора визначаємо за методикою Ларіна [22]. Синтез системи стабілізації здійснюємо за допомогою програмного середовища MatLab. Для зручності роботи в середовищі замість оператора p використовуємо оператор s . Передаточна функція $W(s)$ регулятора матиме вигляд:

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

де $B_-(s)$, $G(-s)$, $\Gamma_0(s)$ та $\Gamma_1(s)$ визначаються формулами

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

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

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

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

$$S_\psi(s) = \frac{\Gamma_1(s)\Gamma_1(-s)}{\Gamma_0(s)\Gamma_0(-s)}; \quad (3.10)$$

$\alpha(s)$ та $\beta(s)$ — вибираються довільно;

$\Gamma_0(s)$ та $\Gamma_1(s)$ — поліноми, що мають нулі лише в лівій півплощині.

По-перше, потрібно привести структурну схему системи до вигляду, зображеного на рисунку 3.1. Це означає, що необхідно визначити поліноми $P(s)$ та $M(s)$, а також спектральну щільність $S_\psi(s)$. Оскільки на наш об'єкт регулювання впливають численні збурення, такі як вологість матеріалу, температура матеріалу, що надходить, і температура топочних газів, будемо вважати ці збурення "білим" шумом. Підставивши знайдені передаточні

функції в початкову структурну схему, вона набуде вигляду, зображеного на рисунку 3.2.

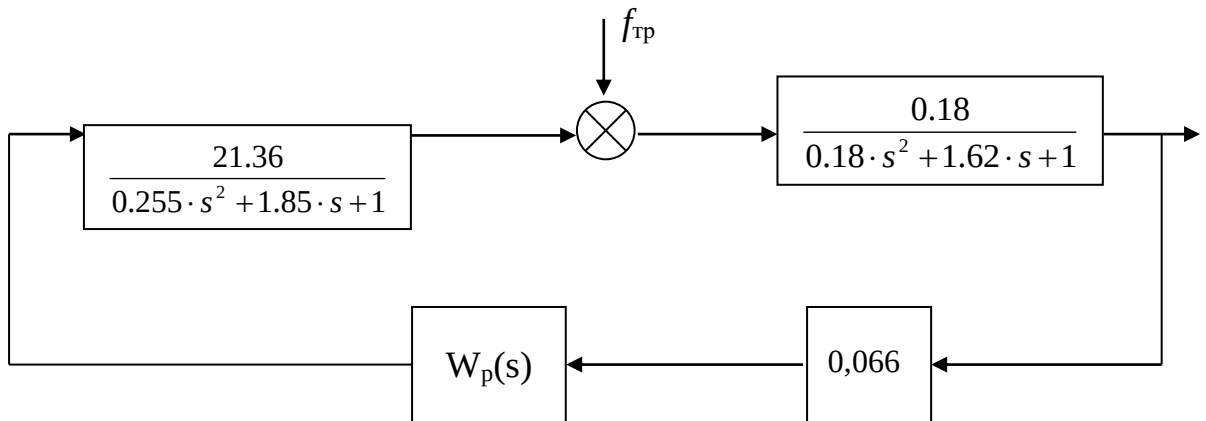


Рисунок 3.2 – Структурна схема системи

Провівши необхідні перетворення, отримаємо:

$$P(s) = 4.5e-2 * (s+8.333) * (s+6.667) * (s+0.6667) * (s+0.5882)$$

$$M(s) = 0.253;$$

І після виконання факторизації $S_\psi(s)$ отримаємо:

$$\Gamma_1(s) = 0.459 * (s+6.67) * (s+0.5582);$$

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

Передаточну функцію $W(s)$ регулятора будемо визначати за умови, що ваговий коефіцієнт функціоналу $r = 1$, а c визначається за допомогою виразу:

$c = -k_c * (s + \omega_c) * (s - \omega_c)$. При $k_c = [0.05; 0.1; 0.5; 1; 5; 10; 50]$ та $\omega_c = [0.01; 0.02; 0.05; 0.1; 0.2; 0.5; 1]$.

Визначаємо передаточну функцію $W(s)$ регулятора для випадку, коли при $r = 1$ та $c = -0.05 * (s+0.01) * (s-0.01)$. Необхідні розрахунки проводимо в

середовищі MatLab. Приймаємо $\alpha = 0$, $\beta = 1$

```
s=zpk('s');
alfa=0;beta=1;
r=1;c=-0.05*(s+0.01)*(s-0.01);
M=0.253;
M_=0.253;
P=4.5e-2*(s+8.333)*(s+6.667)*(s+0.6667)*(s+0.5882);
P_=zpk(-ERMP(P));
g1=0.459*(s+6.67)*(s+0.5582);
g0=1*s^0;
```

$$Q = \alpha * M + \beta * P$$

Ноль/Полюс/Увеличение:

$$0.045 (s+8.333) (s+6.667) (s+0.6667) (s+0.5882)$$

$$G_ = r * M * M_ + c * P * P_$$

Ноль/Полюс/Увеличение:

$$-0.00010125 (s-8.333) (s-6.667) (s+8.333) (s+6.667) (s+0.9415) (s-0.9415) (s^2 + 0.9305s + 0.4807) (s^2 - 0.9305s + 0.4807)$$

$$G_ = -\sqrt{0.00010125} * (s-8.333) * (s-6.667) * (s-0.9415) * (s^2 - 0.9305s + 0.4807)$$

Ноль/Полюс/Увеличение:

$$-0.010062 (s-8.333) (s-6.667) (s-0.9415) (s^2 - 0.9305s + 0.4807)$$

$$R = r * \beta * M_ - c * \alpha * P_$$

Ноль/Полюс/Увеличение:

$$0.253$$

$$B = \minreal(R * g1 / (G_ * Q * g0))$$

$$-256.4621 (s+6.67) (s+0.5582)$$

$$\frac{(s-8.333) (s-6.667) (s+8.333) (s+6.667) (s-0.9415) (s+0.6667) (s+0.5882) (s^2 - 0.9305s + 0.4807)}{}$$

$$[B0, B_] = SRWN(B)$$

Ноль/Полюс/Увеличение:

$$0.18874 (s+8.341) (s+6.667) (s+0.5495)$$

$$\frac{(s+8.333) (s+6.667) (s+0.6667) (s+0.5882)}{}$$

Ноль/Полюс/Увеличение:

$$-0.18874 (s-8.212) (s-6.919) (s^2 - 2.44s + 3.467)$$

$$\frac{(s-8.333) (s-6.667) (s-0.9415) (s^2 - 0.9305s + 0.4807)}{}$$

$$W = \minreal((-r * M_ * g1 / G_ + P * g0 * B_) / (c * P_ * g1 / G_ + M * g0 * B_), 0.001)$$

Ноль/Полюс/Увеличение:

$$-0.08275 (s+8.341) (s+0.5495)$$

$$\frac{(s^2 + 1.173s + 0.5462)}{}$$

Таким чином, ми отримали передаточну функцію регулятора при $r = 1$. та

$$c = -0.05 \cdot (s + 0.01) \cdot (s - 0.01);$$

$$W_p(s) = \frac{-0.08275 (s + 8.341) (s + 0.5495)}{(s^2 + 1.173s + 0.5462)}.$$

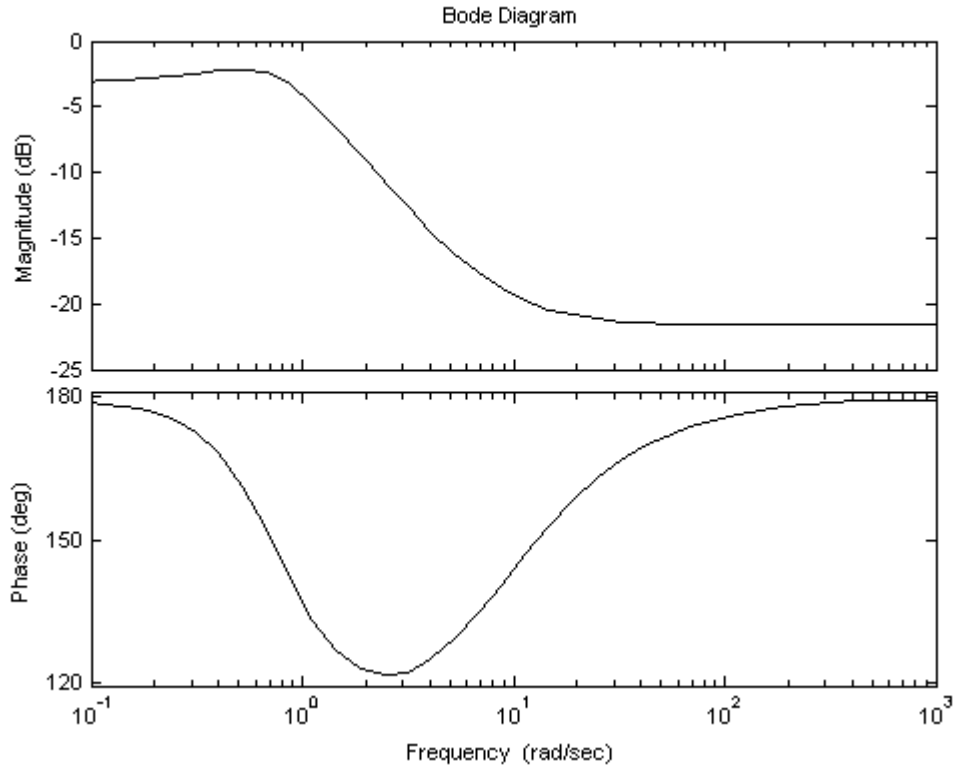


Рисунок 3.3 - Діаграма передаточної функції регулятора $W(s)$
при $c = -0.05 \cdot (s + 0.01) \cdot (s - 0.01)$

Отже, були отримані передаточні функції для всіх значень K_c і ω_c , а результати були представлені в таблиці, наведеній нижче.

Таблиця 3.1 – Передаточні функції для різних значень вагових коефіцієнтів K_c і ω_c

$\omega \backslash k$	0.05	0.1
0.01	$\frac{-0.08275 (s+8.341) (s+0.5495)}{(s^2 + 1.173s + 0.5462)}$	$\frac{-0.047728 (s+8.34) (s+0.5488)}{(s^2 + 1.046s + 0.3991)}$
0.02	$\frac{-0.082742 (s+8.341) (s+0.5495)}{(s^2 + 1.173s + 0.5463)}$	$\frac{-0.047718 (s+8.34) (s+0.5488)}{(s^2 + 1.046s + 0.3993)}$
0.05	$\frac{-0.082673 (s+8.341) (s+0.5495)}{(s^2 + 1.175s + 0.5469)}$	$\frac{-0.047659 (s+8.34) (s+0.5488)}{(s^2 + 1.048s + 0.4)}$
0.1	$\frac{-0.082442 (s+8.341) (s+0.5495)}{(s^2 + 1.18s + 0.549)}$	$\frac{-0.047458 (s+8.34) (s+0.5488)}{(s^2 + 1.054s + 0.4028)}$
0.2	$\frac{-0.081523 (s+8.341) (s+0.5496)}{(s^2 + 1.199s + 0.5573)}$	$\frac{-0.046682 (s+8.34) (s+0.5489)}{(s^2 + 1.079s + 0.4138)}$
0.5	$\frac{-0.075999 (s+8.341) (s+0.5497)}{(s^2 + 1.326s + 0.612)}$	$\frac{-0.042311 (s+8.34) (s+0.5491)}{(s^2 + 1.231s + 0.4842)}$
1	$\frac{-0.063461 (s+8.342) (s+0.55)}{(s^2 + 1.686s + 0.7771)}$	$\frac{-0.033762 (s+8.342) (s+0.5497)}{(s^2 + 1.631s + 0.6804)}$
$\omega \backslash k$	0.5	1
0.01	$\frac{-0.012383 (s+8.338) (s+0.5472)}{(s^2 + 0.8283s + 0.1892)}$	$\frac{-0.0067237 (s+8.338) (s+0.5466)}{(s+0.4777) (s+0.2852)}$
0.02	$\frac{-0.012377 (s+8.338) (s+0.5472)}{(s^2 + 0.8288s + 0.1894)}$	$\frac{-0.0067195 (s+8.338) (s+0.5466)}{(s+0.4776) (s+0.286)}$
0.05	$\frac{-0.01234 (s+8.338) (s+0.5472)}{(s^2 + 0.8321s + 0.1911)}$	$\frac{-0.0066897 (s+8.338) (s+0.5467)}{(s+0.4765) (s+0.2914)}$
0.1	$\frac{-0.012209 (s+8.338) (s+0.5473)}{(s^2 + 0.8434s + 0.1968)}$	$\frac{-0.0065874 (s+8.338) (s+0.5468)}{(s+0.4721) (s+0.3108)}$
0.2	$\frac{-0.011748 (s+8.338) (s+0.5475)}{(s^2 + 0.8858s + 0.2185)}$	$\frac{-0.0062487 (s+8.338) (s+0.5471)}{(s^2 + 0.8363s + 0.1749)}$
0.5	$\frac{-0.0097889 (s+8.339) (s+0.5483)}{(s^2 + 1.107s + 0.334)}$	$\frac{-0.0050316 (s+8.339) (s+0.5481)}{(s^2 + 1.085s + 0.3081)}$

1	$\frac{-0.0072084 (s+8.341) (s+0.5493)}{(s+0.602) (s+0.973)}$	$\frac{-0.0036406 (s+8.341) (s+0.5492)}{(s+0.987) (s+0.5797)}$
$\omega \backslash k$	5	10
0.01	$\frac{-0.0015359 (s+8.337)}{(s+0.1152)}$	$\frac{-0.00079666 (s+8.337) (s+0.5453)}{(s+0.5521) (s+0.08143)}$
0.02	$\frac{-0.0015334 (s+8.337)}{(s+0.1165)}$	$\frac{-0.0007949 (s+8.337) (s+0.5453)}{(s+0.5521) (s+0.08326)}$
0.05	$\frac{-0.0015173 (s+8.337)}{(s+0.1254)}$	$\frac{-0.00078333 (s+8.337) (s+0.5454)}{(s+0.5521) (s+0.0951)}$
0.1	$\frac{-0.0014693 (s+8.337)}{(s+0.1531)}$	$\frac{-0.00075209 (s+8.337) (s+0.5457)}{(s+0.552) (s+0.1289)}$
0.2	$\frac{-0.0013456 (s+8.338) (s+0.5465)}{(s+0.5445) (s+0.2338)}$	$\frac{-0.00068121 (s+8.338) (s+0.5464)}{(s+0.2172) (s+0.5516)}$
0.5	$\frac{-0.0010323 (s+8.339) (s+0.548)}{(s^2 + 1.064s + 0.2852)}$	$\frac{-0.00051789 (s+8.339) (s+0.5479)}{(s^2 + 1.061s + 0.2822)}$
1	$\frac{-0.00073371 (s+8.341) (s+0.5492)}{(s+0.9975) (s+0.5625)}$	$\frac{-0.00036736 (s+8.341) (s+0.5492)}{(s+0.9987) (s+0.5603)}$
$\omega \backslash k$	50	
0.01	$\frac{-0.00016799 (s+8.337) (s+0.5448)}{(s+0.557) (s+0.03757)}$	
0.02	$\frac{-0.00016715 (s+8.337) (s+0.5448)}{(s+0.557) (s+0.04136)}$	

0.05	$\frac{-0.00016279 (s+8.337) (s+0.5451)}{(s+0.557) (s+0.06169)}$	
0.1	$\frac{-0.00015398 (s+8.337) (s+0.5455)}{(s+0.557) (s+0.1064)}$	
0.2	$\frac{-0.00013772 (s+8.338) (s+0.5464)}{(s+0.2035) (s+0.5569)}$	
0.5	$\frac{-0.00010387 (s+8.339) (s+0.5479)}{(s+0.5064) (s+0.5524)}$	
1	$\frac{-7.3535e-005 (s+8.341) (s+0.5492)}{(s+1) (s+0.5586)}$	

3.2 Оцінка якості розв'язку задачі регулювання

Якість системи автоматичного регулювання визначається за значенням квадратичного функціоналу (3.3)

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

де r та c — вагові коефіцієнти, а $\langle x^2 \rangle, \langle u^2 \rangle$ — дисперсії величин x та u .

Потрібно визначити значення вагових коефіцієнтів r та c , при яких функціонал досягатиме мінімуму.

З рівнянь (3.1 – 3.4) визначимо передаточні функції, що описують взаємозв'язок між координатами системи та зовнішніми впливами:

$$\left. \begin{aligned} x(s) &= F_x(s)\psi(s) = \frac{1}{P(s) - M(s)W(s)} \psi(s), \\ u(s) &= F_u(s)\psi(s) = \frac{W(s)}{P(s) - M(s)W(s)} \psi(s), \\ u(s) &= W(s)x(s) = F_u(s)F_x^{-1}(s)x(s), \end{aligned} \right\} \quad (3.11)$$

$W(s) = W_0^{-1}(s)\tilde{W}(s)$ Оскільки замкнута система повинна бути стійкою, а відповідно функції $F_x(s)$ та $F_u(s)$ мають бути фізично здійсненними (не повинні містити полюсів у правій півплощині), скористаємося перетворенням Фур'є (підставивши $s = i \cdot \omega$), і функціонал (2.8) можна записати у вигляді:

$$J = \frac{1}{i} \int_{-i\infty}^{i\infty} [rF_x(s)F_x(-s)S_\psi(s) + cF_u(s)F_u(-s)S_\psi(s)]ds. \quad (3.12)$$

Для визначення функціоналу спершу потрібно знайти функції $F_x(s)$ та $F_u(s)$ при значеннях c , яке визначається виразом $c = -k_c \cdot (s + \omega_c) \cdot (s - \omega_c)$. При $k_c = [0.05; 0.1; 0.5; 1; 5; 10; 50]$ та $\omega_c = [0.01; 0.02; 0.05; 0.1; 0.2; 0.5; 1]$.

Далі, використовуючи функцію `norm` в середовищі MatLab, визначимо функціонал.

$$\text{norm}\left(F(s) \cdot \frac{\Gamma_1(s)}{\Gamma_0(s)}\right) = \sqrt{\frac{1}{i} \int_{-i\infty}^{i\infty} F(s)F(-s)S_\psi(s)ds} \quad (3.13)$$

$$J = r \cdot \left(\text{norm}\left(F_x(s) \cdot \frac{\Gamma_1(s)}{\Gamma_0(s)}\right) \right)^2 + c \cdot \left(\text{norm}\left(F_u(s) \cdot \frac{\Gamma_1(s)}{\Gamma_0(s)}\right) \right)^2 \quad (3.14)$$

Визначаємо функціонал при допомозі $c = -0.05 \cdot (s + 0.01) \cdot (s - 0.01)$

```
s=zpk('s');
>> g1=0.459*(s+6.67)*(s+0.5582);
>> g0=1*s^0;
>> r=1;c=-0.05*(s+0.01)*(s-0.01);
>> S=g1/g0
```

Ноль/Полюс/Увеличение:
0.459 (s+6.67) (s+0.5582)

```
>> M=0.253;
>> P=4.5e-2*(s+8.333)*(s+6.667)*(s+0.6667)*(s+0.5882);
>> W=-0.08275*(s+8.341)*(s+0.5495)/(s^2 + 1.173s + 0.5462)
>> W=-0.08275*(s+8.341)*(s+0.5495)/(s^2 + 1.173*s + 0.5462)
```

Ноль/Полюс/Увеличение:
-0.08275 (s+8.341) (s+0.5495)

(s^2 + 1.173s + 0.5462)

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

Ноль/Полюс/Увеличение:

22.2222 (s² + 1.173s + 0.5462)

(s+8.333) (s+6.665) (s+0.9416) (s+0.5582) (s² + 0.9302s + 0.4807)

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

Ноль/Полюс/Увеличение:

-1.8389 (s+8.341) (s+0.5495) (s² + 1.173s + 0.5462)

(s+0.9416) (s+0.5582) (s+6.665) (s+8.333) (s² + 1.173s + 0.5462) (s² + 0.9302s + 0.4807)

```
stdx=norm(Fx*S)
```

stdx =

0,3

```
>> stdu=norm(Fu*S)
```

stdu =

5

J=norm(r*stdx²)+norm(c*stdu²)

Ноль/Полюс/Увеличение:

0,7

Функціонал J =0,7, а середньоквадратичні відхилення σ_x =0,3,

σ_u = 5.

Обчислюємо функціонал при $c=-0.1*(s+0.02)*(s-0.02)$;

```
s=zpk('s');
```

```
g1=0.459*(s+6.67)*(s+0.5582);
```

```
g0=1*s^0;
```

```
r=1;c=-0.1*(s+0.02)*(s-0.02);
```

```
S=g1/g0
```

Ноль/Полюс/Увеличение:

0.459 (s+6.67) (s+0.5582)

```
>> M=0.253;
```

```
P=4.5e-2*(s+8.333)*(s+6.667)*(s+0.6667)*(s+0.5882);
```

```
>> W=-0.047718*(s+8.34)*(s+0.5488)/(s2 + 1.046*s + 0.3993)
```

Ноль/Полюс/Увеличение:

$$\frac{-0.047718 (s+8.34) (s+0.5488)}{(s^2 + 1.046s + 0.3993)}$$

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

Ноль/Полюс/Увеличение:

$$22.2222 (s^2 + 1.046s + 0.3993)$$

$$\frac{(s+8.333) (s+6.666) (s+0.8768) (s+0.5582) (s^2 + 0.8671s + 0.3652)}{(s^2 + 1.046s + 0.3993)}$$

$$>> Fu=W/(P-M*W)$$

Ноль/Полюс/Увеличение:

$$-1.0604 (s+8.34) (s+0.5488) (s^2 + 1.046s + 0.3993)$$

$$\frac{(s+0.5582) (s+0.8768) (s+6.666) (s+8.333) (s^2 + 1.046s + 0.3993) (s^2 + 0.8671s + 0.3652)}{(s^2 + 1.046s + 0.3993)}$$

$$\text{stdx}=\text{norm}(Fx*S)$$

$$\text{stdx} =$$

$$0,42$$

$$>> \text{stdu}=\text{norm}(Fu*S)$$

$$\text{stdu} =$$

$$3,7$$

$$>> J=\text{norm}(r*\text{stdx}^2)+\text{norm}(c*\text{stdu}^2)$$

Ноль/Полюс/Увеличение:

$$0.34$$

Функціонал $J = 0.34$, а середньоквадратичні відхилення $\sigma_x = 0,42$,

$$\sigma_u = 3,7.$$

Обчислюємо функціонал при $c=-0.5*(s+0.05)*(s-0.05)$;

$$s=\text{zpk}('s');$$

$$g1=0.459*(s+6.67)*(s+0.5582);$$

$$g0=1*s^0;$$

$$r=1;c=-0.5*(s+0.05)*(s-0.05);$$

$$S=g1/g0$$

Ноль/Полюс/Увеличение:

$$0.459 (s+6.67) (s+0.5582)$$

```

M=0.253;
P=4.5e-2*(s+8.333)*(s+6.667)*(s+0.6667)*(s+0.5882);
>> W=-0.01234 *(s+8.338) *(s+0.5472)/(s^2 + 0.8321*s + 0.1911)

```

```

Ноль/Полюс/Увеличение:
-0.01234 (s+8.338) (s+0.5472)

```

```

-----
(s^2 + 0.8321s + 0.1911)

```

```

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

```

```

Ноль/Полюс/Увеличение:
22.2222 (s^2 + 0.8321s + 0.1911)

```

```

-----
(s+8.333) (s+6.667) (s+0.7684) (s+0.5582) (s^2 + 0.7608s + 0.188)

```

```

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

```

```

Ноль/Полюс/Увеличение:

```

```

-0.27422 (s+8.338) (s+0.5472) (s^2 + 0.8321s + 0.1911)

```

```

-----
(s+0.5582) (s+0.7684) (s+6.667) (s+8.333) (s^2 + 0.8321s + 0.1911) (s^2 + 0.7608s + 0.188)

```

```

stdx=norm(Fx*S)

```

```

stdx =

```

```

0.51

```

```

>> stdu=norm(Fu*S)

```

```

stdu =

```

```

2,67

```

```

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

```

```

Ноль/Полюс/Увеличение:

```

```

0,27

```

Функціонал $J = 0,27$, а середньоквадратичні відхилення $\sigma_x = 0.51$,

$\sigma_u = 2,67$.

Обчислюємо функціонал при $c = -1*(s+0.1)*(s-0.1)$;

```

s=zpk('s');
g1=0.459*(s+6.67)*(s+0.5582);
g0=1*s^0;
r=1;c=-1*(s+0.1)*(s-0.1);

```

$$S=g1/g0$$

Ноль/Полюс/Увеличение:
0.459 (s+6.67) (s+0.5582)

```
>> M=0.253;
P=4.5e-2*(s+8.333)*(s+6.667)*(s+0.6667)*(s+0.5882);
>> W=-0.0065874 *(s+8.338)* (s+0.5468)/((s+0.4721)* (s+0.3108))
```

Ноль/Полюс/Увеличение:
-0.0065874 (s+8.338) (s+0.5468)

$$\frac{-0.0065874 (s+8.338) (s+0.5468)}{(s+0.4721) (s+0.3108)}$$

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

Ноль/Полюс/Увеличение:
22.2222 (s+0.4721) (s+0.3108)

$$\frac{22.2222 (s+0.4721) (s+0.3108)}{(s+8.333) (s+6.667) (s+0.7373) (s+0.5582) (s^2 + 0.7424s + 0.1472)}$$

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

Ноль/Полюс/Увеличение:
-0.14639 (s+8.338) (s+0.5468) (s+0.4721) (s+0.3108)

$$\frac{-0.14639 (s+8.338) (s+0.5468) (s+0.4721) (s+0.3108)}{(s+0.4721) (s+0.5582) (s+0.7373) (s+0.3108) (s+6.667) (s+8.333) (s^2 + 0.7424s + 0.1472)}$$

```
stdx=norm(Fx*S)
```

stdx =

0.6

```
>> stdu=norm(Fu*S)
```

stdu =

1,6

```
>> J=r*stdx^2+c*stdu^2
```

Ноль/Полюс/Увеличение:
0,326

Функціонал $J = 0,326$, а середньоквадратичні відхилення $\sigma_x = 0.6$,

$$\sigma_u = 1,6.$$

Обчислюємо функціонал при $c = -5*(s+0.2)*(s-0.2)$;

```
s=zpk('s');
g1=0.459*(s+6.67)*(s+0.5582);
g0=1*s^0;
r=1;c=-5*(s+0.2)*(s-0.2);
S=g1/g0
```

Ноль/Полюс/Увеличение:

0.459 (s+6.67) (s+0.5582)

```
>> M=0.253;
```

```
P=4.5e-2*(s+8.333)*(s+6.667)*(s+0.6667)*(s+0.5882);
```

```
>> W=-0.0013456 *(s+8.338) *(s+0.5465)/((s+0.5445)* (s+0.2338))
```

Ноль/Полюс/Увеличение:

-0.0013456 (s+8.338) (s+0.5465)

(s+0.5445) (s+0.2338)

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

Ноль/Полюс/Увеличение:

22.2222 (s+0.5445) (s+0.2338)

(s+8.333) (s+6.667) (s+0.6928) (s+0.5582) (s+0.5405) (s+0.2419)

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

Ноль/Полюс/Увеличение:

-0.029902 (s+8.338) (s+0.5465) (s+0.5445) (s+0.2338)

(s+0.5445) (s+0.5405) (s+0.5582) (s+0.6928) (s+0.2419) (s+0.2338) (s+6.667) (s+8.333)

```
stdx=norm(Fx*S)
```

```
stdx =
```

0.65

```
>> stdu=norm(Fu*S)
```

```
stdu =
```

0.4

```
>> J=r*stdx^2+c*stdu^2
```

Ноль/Полюс/Увеличение:

0,89

Функціонал $J = 0.89$, а середньоквадратичні відхилення $\sigma_x = 0.65$,

$\sigma_u = 0.4$.

Обчислюємо функціонал при $c = -10 \cdot (s+0.5) \cdot (s-0.5)$;

```
s=zpk('s');  
g1=0.459*(s+6.67)*(s+0.5582);  
g0=1*s^0;  
r=1;c=-10*(s+0.5)*(s-0.5);  
S=g1/g0
```

Ноль/Полюс/Увеличение:
 $0.459 (s+6.67) (s+0.5582)$

```
>> M=0.253;  
P=4.5e-2*(s+8.333)*(s+6.667)*(s+0.6667)*(s+0.5882);  
>> W=-0.00051789*(s+8.339)*(s+0.5479)/(s^2 + 1.061*s + 0.2822)
```

Ноль/Полюс/Увеличение:
 $-0.00051789 (s+8.339) (s+0.5479)$

 $(s^2 + 1.061s + 0.2822)$

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

Ноль/Полюс/Увеличение:
 $22.2222 (s^2 + 1.061s + 0.2822)$

 $(s+8.333) (s+6.667) (s+0.6919) (s+0.5584) (s^2 + 1.066s + 0.2871)$

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

Ноль/Полюс/Увеличение:
 $-0.011509 (s+8.339) (s+0.5479) (s^2 + 1.061s + 0.2822)$

 $(s+0.5584) (s+0.6919) (s+6.667) (s+8.333) (s^2 + 1.061s + 0.2822) (s^2 + 1.066s + 0.2871)$

```
>> stdx=norm(Fx*S)
```

stdx =

0.68

```
>> stdu=norm(Fu*S)
```

stdu =

0.01

$J = r \cdot \text{stdx}^2 + c \cdot \text{stdu}^2$

Ноль/Полюс/Увеличение:
5,35

Функціонал $J = 5,35$, а середньоквадратичні відхилення $\sigma_x = 0.68$, $\sigma_u = 0.01$.

Обчислюємо функціонал при $c = -50 \cdot (s+1) \cdot (s-1)$;

```
s=zpk('s');  
g1=0.459*(s+6.67)*(s+0.5582);  
g0=1*s^0;  
r=1;c=-50*(s+1)*(s-1);  
S=g1/g0
```

Ноль/Полюс/Увеличение:
0.459 (s+6.67) (s+0.5582)

```
>> M=0.253;  
P=4.5e-2*(s+8.333)*(s+6.667)*(s+0.6667)*(s+0.5882);  
>> W=-7.3535e-005 *(s+8.341) *(s+0.5492)/((s+1)* (s+0.5586))
```

Ноль/Полюс/Увеличение:
-7.3535e-005 (s+8.341) (s+0.5492)

(s+1) (s+0.5586)

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

Ноль/Полюс/Увеличение:
22.2222 (s+1) (s+0.5586)

(s+8.333) (s+6.667) (s+1.001) (s+0.6637) (s+0.591) (s+0.5582)

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

Ноль/Полюс/Увеличение:
-0.0016341 (s+8.341) (s+1) (s+0.5586) (s+0.5492)

(s+1) (s+1.001) (s+0.6637) (s+0.591) (s+0.5586) (s+0.5582) (s+6.667) (s+8.333)

```
>> stdx=norm(Fx*S)
```

stdx =

0.7

```
>> stdu=norm(Fu*S)
```

stdu =

0,005

```
>> J=r*stdx^2+c*stdu^2
```

Ноль/Полюс/Увеличение:
10

Функціонал $J = 10$, а середньоквадратичні відхилення $\sigma_x = 0.7$,
 $\sigma_u = 0,005$

Значення середньоквадратичного відхилення σ_x для всіх варіацій s зібрані в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – σ_x для різних значень Kc і ω_c вагового коефіцієнта s .

$\omega_c \backslash Kc$	0,05	0,1	0,5	1	5	10	50
0,01	0,3	0,4	0,46	0,49	0,51	0,53	0,53
0,02	0,35	0,42	0,48	0,52	0,54	0,56	0,6
0,05	0,38	0,47	0,51	0,56	0,58	0,61	0,64
0,1	0,4	0,5	0,56	0,6	0,62	0,645	0,665
0,2	0,41	0,51	0,57	0,61	0,65	0,665	0,68
0,5	0,415	0,515	0,58	0,63	0,66	0,68	0,69
1	0,42	0,52	0,61	0,65	0,67	0,69	0,7

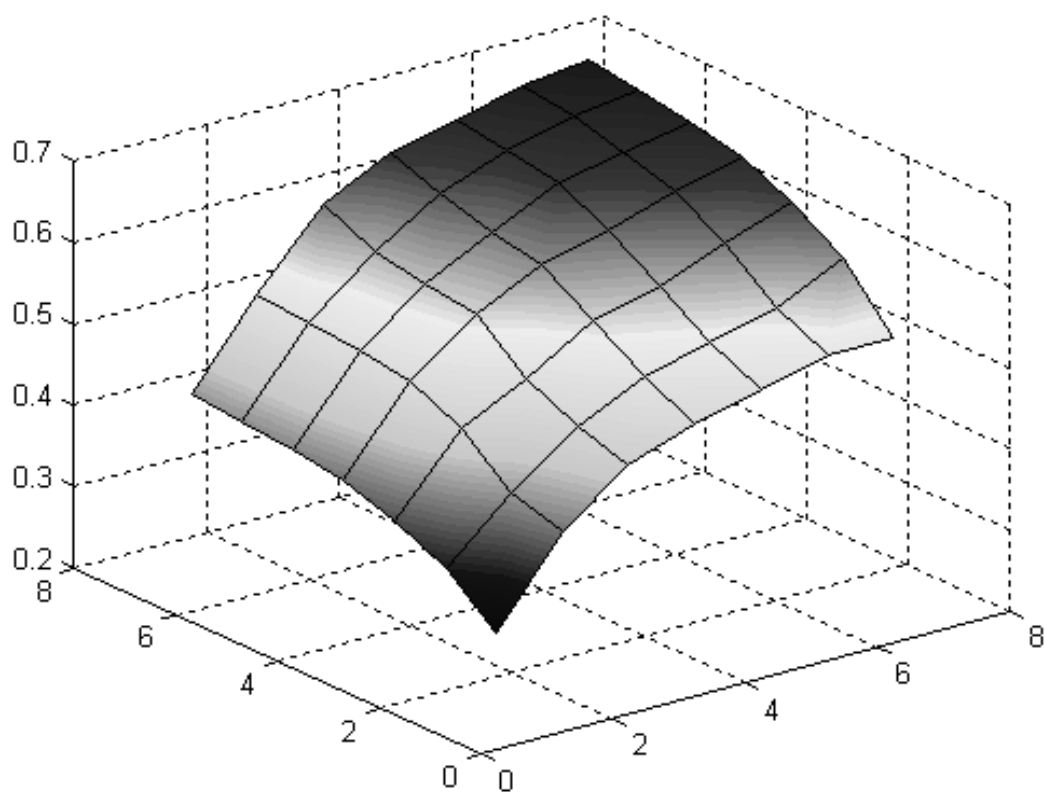


Рисунок 3.10 – Діаграма залежності σ_x від вагового коефіцієнта s .

Значення середньоквадратичного відхилення σ_u для всіх варіацій s представлені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – σ_u для різних значень K_s і ω_s вагового коефіцієнта s

$\omega_s \backslash K_s$	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

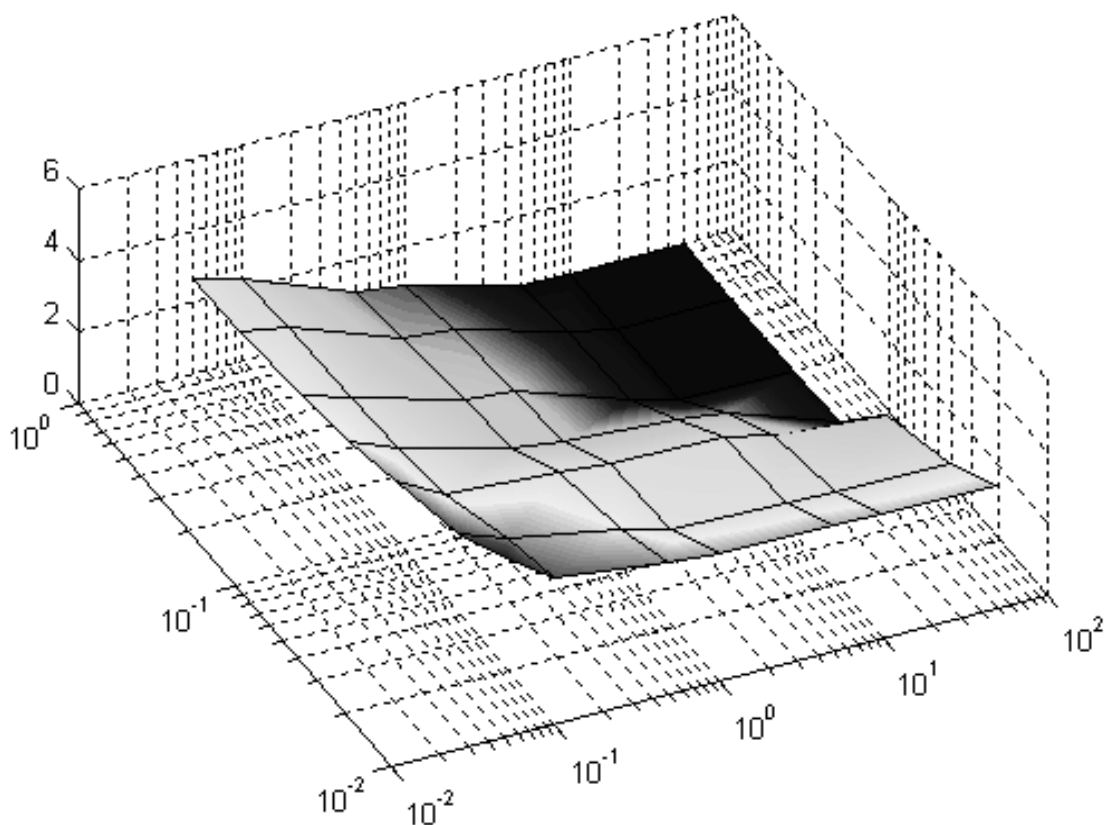


Рисунок 3.11 – Діаграма залежності σ_u від вагового коефіцієнта s .

Значення функціоналу σ_u для всіх варіацій s представлені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – σ_u для різних значень K_s і ω_c вагового коефіцієнта s

$\omega_c \backslash K_s$	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	10

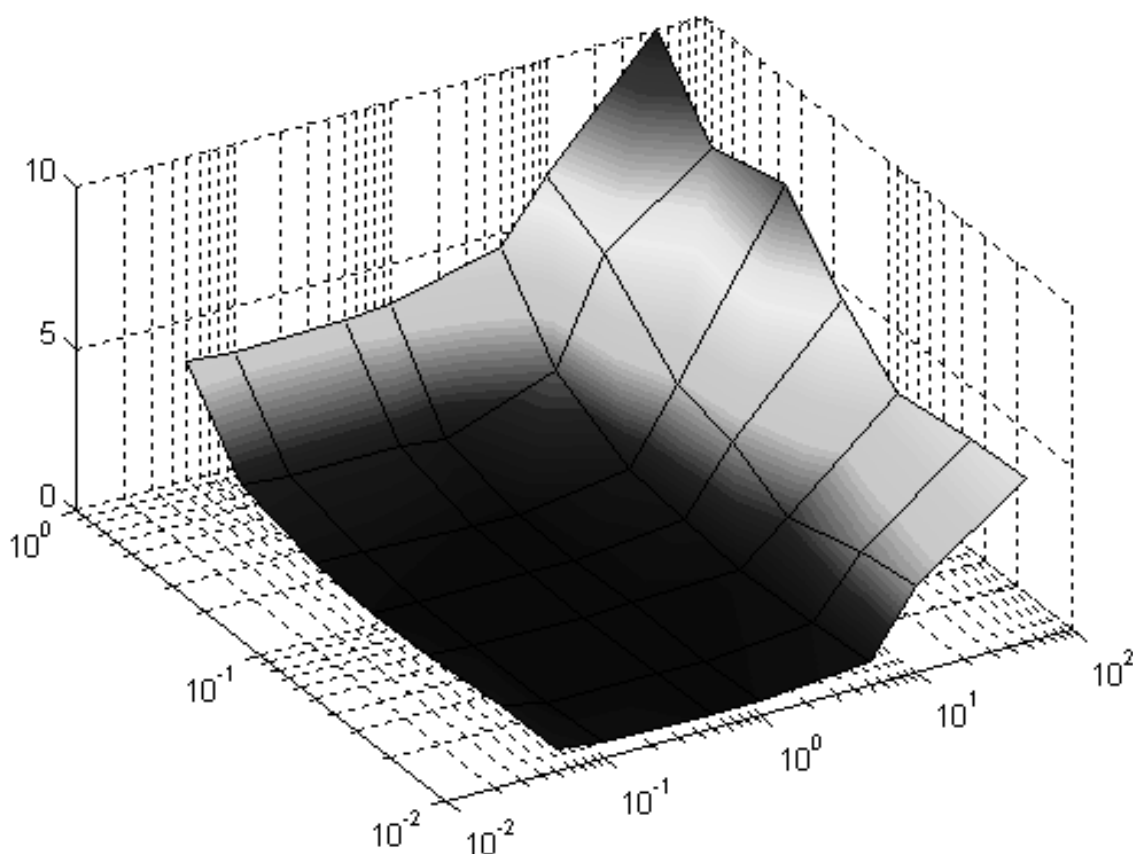


Рисунок 3.12 – Діаграма залежності функціоналу J від вагового коефіцієнта s

Аналізуючи дані таблиць 3.2–3.4 та графіки на рис. 3.10–3.12, можна зробити висновок, що середнє квадратичне відхилення вихідного сигналу σ_x зростає зі збільшенням коефіцієнтів K_c , ω_c та вагового коефіцієнта c , в той час як середнє квадратичне відхилення управляючого сигналу σ_u зменшується. Мінімальне значення функціоналу якості $J = 0,3$ досягається при $K_c=0,5$ та $\omega_c=0,1$, тому для практичної реалізації був обраний регулятор з цими значеннями.

4 Втілення системи автоматичного регулювання на практиці

4.1 Обчислення Z-перетворення передатної функції регулятора

Для впровадження мікропроцесорної системи регулювання потрібно виконати Z-перетворення передатної функції регулятора, отриманої під час синтезу в розділі 3.1.

$$W_p(s) = -\frac{0.012209(s + 8.338)(s + 0.5473)}{(s^2 + 0.8434s + 0.1968)}. \quad (4.1)$$

Здійснимо розкладання передатної функції регулятора на прості дробки:

$$W_p(s) = -0.0122 - \frac{0.09819s + 0.05331}{s^2 + 0.8434s + 0.1968}. \quad (4.2)$$

Тепер здійснимо Z-перетворення за допомогою середовища MatLab при дискретизації з інтервалом $T_0 = 0,01$ с.

$$W_p(z) = -0.0122 - \frac{0.0009804z + 0.0009751}{z^2 - 1.992z + 0.9916}. \quad (4.3)$$

$$W_p(z) = -0.0122 - \frac{0.0009804z^{-1} + 0.0009751z^{-2}}{1 - 1.992z^{-1} + 0.9916z^{-2}} \quad (4.4)$$

На основі отриманої дискретної передатної функції регулятора формулюємо різницеві рівняння:

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

$$u_1[n] = -0.0122x[n];$$

$$u_2[n] = 0.0009804x[n-1] + 0.0009751x[n-2] - 1.992u_2[n-1] + 0.9916u_2[n-2].$$

Схему програмної реалізації представлено на рисунку 3.11, де коефіцієнти мають такі значення:

$$a = -0.0122; b_1 = 0.0009804; b_2 = 0.0009751;$$

$$c_1 = -1.992; c_2 = 0.9916.$$

На основі отриманої схеми програмної реалізації необхідно створити регулятор за допомогою мікропроцесора.

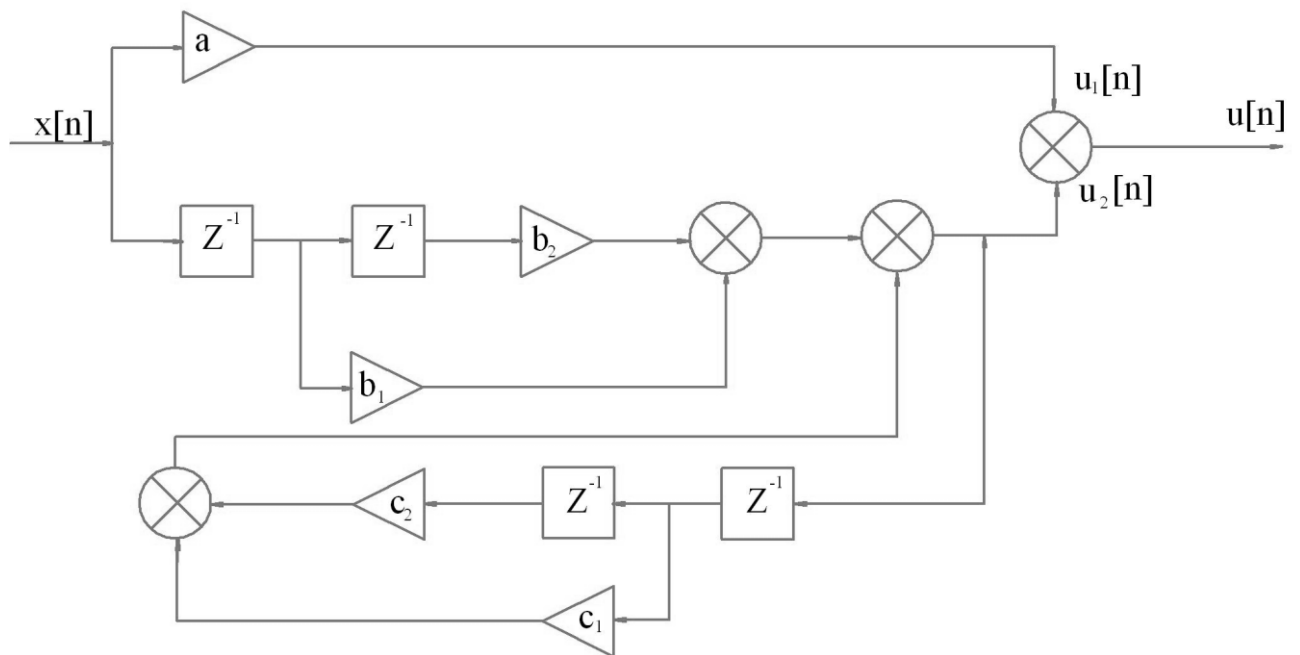


Рисунок 4.1 – Схема реалізації регулятора у програмному забезпеченні

4.2 Опис основної схеми регулятора

Цифровий регулятор реалізуємо на базі однокристальної мікроЕОМ AVR – AT89C2051.

Цей мікроконтролер має такі особливості:

8-розрядний AVR® мікроконтролер з 2 Кбайт Flash-пам'яті та підтримкою внутрішньосистемного програмування.

Основні характеристики:

Сумісний з пристроями сімейства MCs-51.

Об'єм перепрограмованої Flash-пам'яті: 2 Кбайт, 1000 циклів стирання та запису.

Пристрій виготовляється за допомогою технології енергонезалежної пам'яті з високою щільністю, розробленої компанією Atmel. Вбудована Flash-пам'ять з підтримкою внутрішнього програмування дозволяє

перепрограмувати програмний код без виведення з системи, використовуючи SPI інтерфейс або стандартний програматор енергонезалежної пам'яті. Поєднання удосконаленого 8-розрядного RISC CPU та Flash-пам'яті з внутрішнім програмуванням на одному кристалі забезпечує високу продуктивність мікроконтролера, пропонуючи гнучке та економічно ефективне рішення для різних систем керування.

Для отримання даних з датчиків застосовується паралельний інтерфейс RS-485, реалізований на мікросхемі MAX1481 компанії MAXIM. Для опитування трьох термopідвісок використовуються три мікросхеми паралельного інтерфейсу, позначені як DD1-DD3.

Паралельний інтерфейс RS-485 також застосовується для з'єднання мікроконтролера з блоком перетворення сигналів термопар, що забезпечує передачу керуючого сигналу та отримання інформації про температуру гранул.

Для отримання інформації про температуру в БГС на різних рівнях використовується індикатор типу MT-107-7, а для вибору датчиків, з яких необхідно зняти показники температури, застосовується клавіатура 3x4.

Система повністю відповідає вимогам, з обраним часом дискретизації $T_0 = 0.01$.

Висновки

1. Проаналізовано апарати різної конструкції для виробництва гранульованих мінеральних добрив, а також розглянуті переваги та недоліки технологій виробництва на цих апаратах з огляду на якість отримуваних гранул.
2. Розроблена структурна схема системи автоматичного регулювання температури гранул на виході БГС шляхом регулювання потоку через заслонку клапана, для чого були обрані термопара та клапан.
3. Здійснено синтез передаточних функцій для різних вагових коефіцієнтів з метою досягнення оптимального рішення задачі регулювання температури гранул на виході БГС.
4. Під час аналізу якості було обрано регулятор з найкращим значенням функціоналу якості $J=0,27$ та середньоквадратичними відхиленнями $\sigma_x = 0.51$ та $\sigma_u = 2,67$.
5. Розроблено алгоритм програмної реалізації оптимального регулятора та побудовано його схемну реалізацію на мікроконтролері AT89C2051. Також створено електричну принципову схему для даного алгоритму.

Список літератури

1. Романенко В.Д. Методи автоматизації прогресивних технологій.- К.:Вища школа,1995.-519 с.
2. Стеклов В.К. Проектування систем автоматичного керування.- К.:Вища школа,1995.-231 с.
3. Кузнецов Ю.М., Луців І.В., Дубиняк С.Г. Теорія технічних систем .- К.: Тернопіль, 1998.-310с.
4. Блохін Л.М., Буриченко М.Ю. Статистична динаміка систем управління: Підручник. – К.: НАУ, 2003. – 208 с.
5. Зайцев Г.Ф., Стеклов В.К., Бріцький О.І. Теорія автоматичного управління. – К.: Техніка, 2002. – 688 с.
6. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування: Підручник. – 2-ге вид., – К.: Либідь, 2007. - 656 с.
7. 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.
8. Matlab Documentation.[Електронний ресурс]. - Режим доступу: - <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/control>.
9. Simulink Documentation [Електронний ресурс]. - Режим доступу: Жидецький В. Ц. Основи охорони праці. Підручник. – Вид. 3-є, перероб і доп. / В. Ц. Жидецький. – Львів: УАД, 2006. – 336 с.
10. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці : підруч. 3-є вид., перероб і доп. Львів : УАД, 2006. 336 с.
11. Жидецький В. Ц., Джигирей В. С., Сторожук В. М., Туряб Л. В., Лико Х. І. Практикум з охорони праці. Львів : Афіша, 2000. 352 с.
12. 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.
13. Конституція України. Київ : Вид-во Паливода А. В., 2019. 76 с.

14. Про охорону праці : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/2694-12#Text> (дата звернення: 02.11.2024).
15. Основи законодавства України про охорону здоров'я : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2801-12#Text> (дата звернення 02.11.2024).
16. Про систему громадського здоров'я : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2573-20#n840> (дата звернення 02.11.2024).
17. 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 05.11.2024).
18. Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1105-14> (дата звернення 11.11.2024).
19. Кодекс цивільного захисту України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/5403-17#Text> (дата звернення: 09.11.2024).
20. Кодекс законів про працю України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/322-08#Text> (дата звернення: 19.10.2024).
21. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів. Від 25.07.2006. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1143-06#Text> (дата звернення: 04.11.2024).
22. Правила улаштування електроустановок : вид. офіц. Київ : Міненерговугілля України, 2017. 617 с.

ДОДАТОК А

ОХОРОНА ПРАЦІ

А.1 Законодавча та нормативна база України з охорони праці

Науково технічний прогрес, зміни технології та устаткування призводять до трансформації трудового процесу й умов праці, в цілому. Тому, при розробці нової техніки, технологічних процесів, організації виробництва, обов'язково проводять науковий аналіз можливих небезпечних та шкідливих виробничих факторів та передбачають заходи і засоби, спрямовані на мінімізацію несприятливого впливу небезпечних і шкідливих виробничих чинників на працівників. Все це поєднує у собі велике поняття «охорона праці».

Охорона праці (ОП) – це система законодавчих актів, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних та лікувально-профілактичних заходів і засобів, спрямованих на збереження здоров'я й працездатності людини в процесі праці [10].

В Україні юридичні підвалини щодо ОП утворюють загальні закони та спеціальні юридичні акти [10, 12].

Серед загальних законів, найбільш вагомих у цій царині, слід назвати: 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) і Кодекс законів про працю України (КЗпП).

У ст. 43 Конституції України [13] записано: «Кожен має право на працю, що включає можливість заробляти собі на життя працею, яку він вільно обирає, або на яку вільно погоджується». «Кожен має право на належні, безпечні і здорові умови праці, на заробітну плату, не нижчу від визначеної законом». «Використання праці жінок і неповнолітніх на небезпечних для їхнього здоров'я роботах забороняється».

Кожен, хто працює, має право на відпочинок (ст. 45 Конституції України). Це право забезпечується наданням днів щотижневого відпочинку, а також оплачуваної щорічної відпустки, встановленням скороченого робочого дня щодо окремих професій і виробництв, скороченої тривалості роботи у нічний час [10, 12, 13].

У тексті ст. 46 Конституції України вказано на те, що громадяни мають право на соціальний захист, що включає право на забезпечення їх у разі повної, часткової або тимчасової втрати працездатності, втрати годувальника, безробіття з незалежних від них обставин, а також у старості та в інших випадках, передбачених законом [10, 12, 13].

Основоположним законодавчим документом в галузі ОП є Закон України «Про охорону праці» [14], дія якого поширюється на всі підприємства, установи і організації, незалежно від форм власності та видів їх діяльності, на усіх громадян, які працюють, а також залучені до праці на цих підприємствах.

Верховна Рада України прийняла Закон України «Про охорону праці» 14 жовтня 1992 року. Цей Закон визначає основні положення щодо реалізації конституційного права громадян на охорону їх життя і здоров'я в процесі трудової діяльності, регулює, за участю відповідних державних органів, відносини між власником підприємства, установи, організації, або уповноваженим ним органом, і працівником з питань безпеки, гігієни праці та виробничого середовища і встановлює єдиний порядок організації ОП в Україні. На роботодавця покладений обов'язок створити в кожному структурному підрозділі і на робочому місці умови праці, відповідно до вимог нормативних актів, а також забезпечити додержання прав працівників, гарантованих законодавством про ОП (ст. 13). Керівники та власники підприємств несуть персональну відповідальність за порушення вимог законодавства з ОП [10, 12, 14].

Відповідно до ст. 49 Закону України «Про охорону праці» [14], 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 працівники притягаються до

дисциплінарної, адміністративної або кримінальної відповідальності, згідно із законодавством.

В системі законодавства щодо охорони здоров'я та гігієни праці ключове місце займають Закони України «Основи законодавства України про охорону здоров'я» [15] та «Про систему громадського здоров'я» [16]. Вони 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 санепідеміологічної 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 медико-санітарного законодавства.

Закон України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку» [17] був прийнятий Верховною Радою України 8 лютого 1995 року. Він визначає права й обов'язки громадян у сфері використання ядерної енергії, регулює діяльність, пов'язану з експлуатацією ядерних установок і джерел іонізуючого випромінювання, встановлює правові основи міжнародних зобов'язань України щодо використання ядерної енергії, а також щодо ліквідації наслідків Чорнобильської катастрофи.

В Законі сформульовано основні принципи державної політики щодо використання ядерної енергії та радіаційного захисту: пріоритет захисту людини й довкілля від впливу іонізуючого випромінювання; забезпечення безпеки при використанні ядерної енергії; відкритість і доступність відповідної інформації; встановлення відповідальності за порушення правового режиму безпеки в цій сфері; розмежування функцій державного управління в галузі використання ядерної енергії та державного регулювання ядерної й радіаційної безпеки; створення правового та фінансового механізму відповідальності експлуатуючої організації перед громадянами та суб'єктами господарювання за заподіяну ядерну шкоду тощо. Закон закріплює основні вимоги, що є спільними для

ядерного законодавства всіх держав, які використовують ядерну енергію. Серед них – вимоги щодо: гарантій безпеки ядерних установок, джерел іонізуючого випромінювання та безпечного поводження з ядерними матеріалами; відшкодування шкоди, заподіяної ядерним інцидентом; виконання міжнародних угод в ядерній галузі тощо [10, 12, 17].

Основні принципи соціального страхування від нещасного випадку закріплені у Законі України «Про загальнообов’язкове державне соціальне страхування» [18], який набув чинності з 1 квітня 2001 року:

- 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 і т. д.

КЦЗ України [19], від 2 жовтня 2012 року, 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 АР Крим, органів місцевого самоврядування, права та обов’язки громадян України, іноземців та осіб без громадянства, підприємств, установ та організацій, незалежно від форми власності.

КЗпП України [20] спрямований на охорону трудових прав працюючих. Він ще з 10 грудня 1971 року регулює трудові відносини всіх працівників, сприяючи зростанню продуктивності праці, поліпшенню якості роботи, підвищенню ефективності суспільного виробництва і піднесенню на цій основі матеріального і культурного рівня життя трудящих, зміцненню трудової дисципліни і поступовому перетворенню праці на благо суспільства в першу життєву потребу кожної працездатної людини .

У КЗпП, зокрема, зазначені наступні положення: забороняється залучати до надурочних робіт вагітних жінок і жінок, які мають дітей віком до трьох років (ст. 176), а також осіб молодших 18 років (ст. 192); забороняється застосовувати

працю жінок на важких роботах і роботах із шкідливими або небезпечними умовами праці (ст. 174). В ст. 153 КЗпП зазначено про обов'язковість створення безпечних та нешкідливих умов праці [10, 12, 20].

Спеціальними юридичними актами в галузі ОП є: Нормативно-правові акти з охорони праці (НПАОП), Державні стандарти України (ДСТУ), Державні будівельні норми (ДБН), Державні санітарні правила і норми (ДСанПіН), Державні санітарні норми та правила (ДСНП), Державні санітарні норми (ДСН), Державні санітарні правила (ДСП), Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів (ПТЕЕС), Правила улаштування електроустановок (ПУЕ), норми технічного проектування та інші нормативні акти, виходячи із сфери їх дії [10, 11, 12].

НПАОП, які до початку 2003 року носили назву Державні нормативні акти про охорону праці (ДНАОП), – це правила, стандарти, норми, положення, інструкції та інші документи, яким надано чинність правових норм, обов'язкових для виконання. Законодавством передбачено, що, залежно від сфери дії, НПАОП можуть бути міжгалузевими і галузевими. Всі НПАОП вносяться до Державного Реєстру. Реєстр ДНАОП, що діють на території України, виданий Держнаглядом охорони праці в 1997 році. З 2003 року ведеться реєстр НПАОП, який постійно поповнюється [10, 11, 12].

ДСТУ, як Національні стандарти, поступово вводяться у всіх сферах на заміну стандартів колишнього СРСР (Міждержавних стандартів ГОСТ). ДСТУ почали розроблятися з 1992 р. У сфері ОП можна виділити, наприклад:

- ДСТУ 2293:2014 Охорона праці. Терміни та визначення основних понять.

- ДСТУ 7238:2011 Система стандартів безпеки праці. Засоби колективного захисту працюючих. Загальні вимоги та класифікація.

- ДСТУ 7239:2011 Система стандартів безпеки праці. Засоби індивідуального захисту. Загальні вимоги та класифікація.

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 [10, 12].

Складовою частиною права в галузі гігієни праці є постанови та положення (норми) затверджені Міністерством охорони здоров'я України (до них відносяться ДСанПіН, ДСНП, ДСН, ДСП та ін.) [10, 11, 12].

Правове поле діяльності в галузі пожежної безпеки, утворене КЦЗ України, доповнюють 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 [10, 12].

ПТЕЕС встановлюють основні організаційні й технічні вимоги до експлуатації електроустановок та електрообладнання напругою до 150 кВ включно [21].

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 [22].

Власники підприємств, установ, організацій, або уповноважені ними органи, розробляють, на основі НПАОП, і затверджують власні положення, інструкції або інші нормативні акти з ОП, що діють у межах підприємства, установи, організації [10, 11, 12]. Ці нормативні документи є обов'язковими для керівників, спеціалістів і робітників підприємства, а також для тимчасово залучених до праці на них осіб, студентів та учнів профтехучилищ, які проходять виробничу практику на підприємствах.

Відповідно до ст. 44 Закону України «Про охорону праці», за порушення законів та інших нормативно-правових актів про ОП, створення перешкод для діяльності посадових осіб органів державного нагляду за ОП, а також представників професійних спілок, їх організацій та об'єднань, винні особи

притягаються до дисциплінарної, адміністративної, матеріальної, кримінальної відповідальності, згідно із законом [14].

Держава виступає гарантом створення безпечних та нешкідливих умов праці для працівників підприємств, установ, організацій усіх форм власності.

А.2 Небезпечні та шкідливі фактори виробництва при експлуатації системи автоматичного регулювання температури на виході барабанного гранулятора-сушарки при виробництві мінеральних добрив

На будь-якому виробництві існує та чи інша загроза травматизму, тому вводять поняття шкідливого та небезпечного факторів .

Шкідливий виробничий фактор – виробничий фактор, вплив якого може призвести до погіршення стану здоров'я, зниження працездатності працівника [10, 12].

Небезпечний виробничий фактор – виробничий фактор, дія якого, за певних умов, може призвести до травм або іншого раптового погіршення здоров'я працівника [10, 12].

Шкідливі і небезпечні фактори, за природою їх дії, поділяються на фізичні, хімічні, біологічні та психофізіологічні [10, 11].

Розглянемо виробничі фактори, які можуть мати негативний вплив на працівників при експлуатації системи автоматичного регулювання температури на виході барабанного гранулятора-сушарки при виробництві мінеральних добрив.

До фізичних небезпечних і шкідливих факторів виробництва належать:

- рухомі машини та механізми, незахищені рухомі елементи обладнання, рухомі конструкції, напівфабрикати, готова продукція;
- несприятливі параметри мікроклімату в робочих зонах, підвищена або низька температура поверхонь обладнання, сировини, готової продукції;

- підвищений рівень шуму або вібрації, ультразвуку, інфразвуку;
- можливість виникнення пожежі, оскільки виробництво протікає з використанням високих температур;
- небезпечний рівень напруги в електричній мережі, замикання якої може відбутися крізь тіло людини, підвищений рівень статичної електрики;
- підвищена напруженість електричного або магнітного полів, випромінювання різної природи;
- відсутнє або недосконале природне освітлення, недостатня освітленість робочої зони, підвищена яскравість світла, відсутність контрасту між фоном та об'єктом розрізнення, блиск, підвищена пульсація світлового потоку, підвищений рівень ультрафіолетового або інфрачервоного випромінювання;
- гострі краї, зазубреність і шорсткість поверхонь обладнання, інструментів, напівфабрикатів, готової продукції;
- високий рівень запиленості і загазованості повітря.

Хімічні шкідливості та небезпеки проявляються найчастіше у наявності хімічних речовини та сполук у повітрі робочих зон, а також у величезній кількості хімікатів, застосовуваних безпосередньо у технологічних процесах при виробництві мінеральних добрив.

Хімічні речовини (шкідливі та небезпечні), відповідно до ДСТУ 2293:2014, поділяються:

- а) за характером впливу на організм людини на:
 - подразнюючі;
 - токсичні;
 - сенсибілізуючі;
 - канцерогенні;
 - мутагенні;
 - такі, що впливають на репродуктивну функцію;
- б) за шляхами проникнення в організм людини вони бувають такими, що діють через:

- органи дихання;
- шлунково-кишковий тракт;
- шкіряні покрови і слизові оболонки.

Основним шляхом надходження промислових шкідливих речовин в організм людини є дихальні шляхи. Завдяки величезній (понад 90 м²) всмоктувальній поверхні легенів утворюються сприятливі умови для потрапляння шкідливих речовин у кров.

Шкідливі речовини, що потрапили тим, чи іншим шляхом в організм, можуть викликати отруєння (гострі чи хронічні). Ступінь отруєння залежить від токсичності речовини, її кількості, часу дії, шляху проникнення, метеорологічних умов, індивідуальних особливостей організму. Гострі отруєння виникають в результаті одноразової дії великих доз шкідливих речовин (чадний газ, метан, сірководень). Хронічні отруєння розвиваються внаслідок тривалої дії на людину невеликих концентрацій шкідливих речовин (свинець, ртуть, марганець). Шкідливі речовини потрапивши в організм розподіляються в ньому нерівномірно. Найбільша кількість марганцю накопичується в печінці, фтору – в зубах, свинцю – в кістках. Такі речовини мають властивість утворювати в організмі так зване «депо» і затримуватись в ньому тривалий час.

При хронічному отруєнні шкідливі речовини можуть не лише накопичуватись в організмі (матеріальна акумуляція), але й викликати «накопичення» функціональних ефектів (функціональна кумуляція).

Біологічні небезпечні і шкідливі фактори виробництва включають біологічні об'єкти, дія яких на організм працюючих може призвести до травм або захворювання. До них належать:

- макроорганізми (рослини і тварини);
- мікроорганізми (бактерії, віруси, спірохети, грибки, коки, бацили тощо).

До психофізіологічних небезпечних і шкідливих факторів належать:

- фізичні перенавантаження (статичні і динамічні);
- нервово-психічні перенавантаження (розумові, емоційні, монотонність

або інтенсивність у роботі та ін.).

А.3 Заходи з усунення або зменшення впливу небезпечних та шкідливих факторів виробництва при експлуатації системи автоматичного регулювання температури на виході барабанного гранулятора-сушарки при виробництві мінеральних добрив

Виробничий травматизм і професійні захворювання завдають сьогодні значних збитків. Їх можна уникнути шляхом додержанням вимог трудового законодавства, спеціальних нормативних та інших документів, а також впровадженням у виробництво найновіших досягнень науки і передового досвіду з охорони праці.

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

Безпечність 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 запобігання впливу небезпечних і шкідливих виробничих факторів необхідно виконати ряд організаційних і технічних заходів.

Для унеможливлення механічного травматизму від рухомих частин обладнання, гострих країв, зазубреностей і шорсткостей поверхонь, інструментів, напівфабрикатів, готової продукції застосовуються різноманітні капоти, екрани, огороження, що унеможливають безпосередній контакт 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.

Для захисту від контакту частин тіла працівника з нагрітими елементами устаткування, сировини, напівфабрикатів і готової продукції використовуються різні огороження, кожухи, термоізолюючі покриття та чохла, а також засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) – спецодяг, спецвзуття, захисні рукавиці, головні убори.

Параметри мікроклімату справляють безпосередній вплив на самопочуття людини та її працездатність. Зниження температури за всіх інших однакових умов призводить до зростання тепловіддачі шляхом конвекції та випромінювання і може зумовити переохолодження організму. Підвищення швидкості руху повітря погіршує самопочуття, оскільки сприяє посиленню конвективного теплообміну та процесу тепловіддачі при випаровуванні поту. Встановлено, що при температурі повітря понад 30°C працездатність людини починає падати. Тривалий вплив високої температури, у поєднанні зі значною вологістю, може призвести до накопичення теплоти в організмі і до гіпертермії – стану, при якому температура тіла піднімається до 38-40°C [12].

Відповідно до санітарних норм [10, 11, 12], оптимальні величини показників мікроклімату повинні відповідати:

- температура повітря 16...25°C;
- температура поверхонь 17...25°C;
- відносна вологість повітря 60...40 %;
- швидкість руху повітря 0,1...0,3 м/с.

Проблема підвищених рівнів температур та вологості повітря робочої зони може бути вирішена застосуванням як загальної системи вентиляції, так і локальних (місцевих) систем вентиляції та кондиціонування повітря.

Одним з основних заходів по оптимізації параметрів мікроклімату та складу повітря в виробничих приміщеннях є забезпечення належного обміну повітря.

Загальнообмінна вентиляція повинна розроблятися таким чином, щоб виключалася можливість надходження повітря із приміщення з більшим пилоутворенням в приміщення з меншим виділенням пилу.

Припливна вентиляція є необхідною складовою будь-якого приміщення для того, щоб завжди дихати свіжим і чистим повітрям, обов'язково потрібно забезпечити приплив свіжого повітря в приміщення. Застояне повітря в приміщенні погано впливає на людське здоров'я.

Боротьба із шумом і вібраціями повинна починатися з раціонального конструювання устаткування. До конструктивних і технологічних заходів відносяться:

- зменшення вібрацій і шуму в джерелі їх утворення шляхом зрівноважування обертових мас; застосування матеріалів, що володіють здатністю поглинати коливальну енергію тощо;

- зменшення вібрацій і шуму по шляху поширення засобами віброізоляції і вібропоглинання шляхом застосування гумових амортизаторів, прокладок, а також шумо- і віброгасителів.

Сумарний час контакту з вібруючими поверхнями не повинен перевищувати $\frac{2}{3}$ тривалості робочого дня.

Захист від шуму налічує декілька способів. Найбільш дієвий спосіб – це боротьба з шумом в джерелі його виникнення. Шум знижують також за допомогою звукопоглинання та звукоізоляції. Цей спосіб передбачає використання кожухів із звукопоглинаючих матеріалів, якими відділяють джерело шуму. Зниження шуму акустичною обробкою приміщення передбачає вкривання стелі та верхньої частини стін звукопоглинаючим матеріалом. У якості ЗІЗ використовують звукозахисні навушники, беруші, звукопоглинальний спецодяг.

Для запобігання виникнення пожежі на підприємстві, де експлуатується барабанний гранулятор-сушарка, необхідно передбачити систему протипожежного захисту.

Система протипожежного захисту – це сукупність організаційних заходів,

а також технічних засобів, спрямованих на запобігання впливу на людей небезпечних факторів пожежі та обмеження матеріальних збитків від неї (ДСТУ 2272-93).

Попередження розповсюдження пожеж, в основному визначається пожежною безпекою будівель та споруд і забезпечується: правильним вибором необхідного ступеня вогнестійкості будівельних конструкцій правильними об'ємно-планувальними рішеннями будівель та споруд розташуванням приміщень та виробництв з урахуванням вимог пожежної безпеки; встановленням протипожежних перешкод в будівлях, системах вентиляції, паливних та кабельних комунікаціях обмеженням витікання та розтікання горючих рідин при пожежі улаштуванням протидимного захисту; проектуванням шляхів евакуації; заходами щодо успішного розгортання тактичних дій по гасінню пожежі.

Головним заходом запобігання пожеж і вибухів від електрообладнання є правильний вибір і експлуатація обладнання у вибухо- і пожежонебезпечних приміщеннях. Згідно з ПУЕ [22], приміщення поділяються на вибухонебезпечні (В-I, В-Ia, В-Iб, В-Iг, В-II, В-Па) і пожежонебезпечні (П-I, П-II, П-Па, П-Ш) зони.

Вибухонебезпечна зона – це простір, в якому є або можуть з'явитися вибухонебезпечні суміші.

Пожежонебезпечна зона – це простір, де можуть знаходитися горючі речовини як при нормальному технологічному процесі, так і при можливих його порушеннях. Згідно з ПУЕ [22], якщо об'єм вибухонебезпечної суміші перевищує 5 % вільного об'єму приміщення, то все приміщення належить до відповідного класу вибухонебезпеки. Якщо об'єм вибухонебезпечної суміші дорівнює або менший 5 % вільного об'єму приміщення, то вибухонебезпечною вважається зона приміщення в межах до 5 м по горизонталі і вертикалі від технологічного апарата, від якого можливе виділення горючих газів або пари ЛЗР. Приміщення за межами вибухонебезпечної зони вважається вибухобезпечним, якщо немає інших факторів, які утворюють вибухонебезпечність. Клас зони визначають технологи спільно з електриками

проектної або експлуатаційної організації, виходячи з характеристики навколишнього середовища.

Згідно з ПУЕ [22], в пожежонебезпечних зонах використовується електрообладнання закритого типу, внутрішній простір котрого відділений від зовнішнього середовища оболонкою. Апаратуру керування і захисту, світильники рекомендується застосовувати в пилонепроникному виконанні. Вся електропроводка повинна мати надійну ізоляцію. У вибухонебезпечних зонах та в зовнішніх установках слід використовувати вибухозахищене обладнання. Пускову апаратуру, магнітні пускачі для класів В-I та В-II необхідно виносити за межі вибухонебезпечних приміщень з дистанційним керуванням. Проводи у вибухонебезпечних приміщеннях мають прокладатися у металевих трубах. Може використовуватися броньований кабель. Світильники для класів В-I, В-II, В-IIа також повинні мати вибухозахищене виконання.

Для захисту персоналу від ураження електричним струмом застосовують три основні методи:

- захисне заземлення;
- захисне занулення;
- захисне відключення.

Кожен з цих методів може бути застосований як окремо, така і у поєднанні з іншими (в залежності від специфіки виробництва і наявної електробезпеки).

Для захисту персоналу від впливу електричних та магнітних полів, а також різноманітних випромінювань використовують такі способи та засоби:

- зменшення напруженість та густину потоку електромагнітного випромінювання;
- екранування робочих місць;
- раціональне розташування в робочому приміщенні обладнання, що випромінюють електромагнітну енергію;
- встановлення раціональних режимів роботи обладнання та обслуговуючого персоналу;
- застосування засобів попереджувальної сигналізації та ЗІЗ.

Світло в процесі праці впливає не лише на функцію органів зору працівника, а й на діяльність людського організму в цілому. При поганому освітленні людина швидко втомлюється, працює менш продуктивно, зростає потенціальна небезпека помилкових дій і нещасних випадків. Згідно зі статистичними даними, до 5 % травм можна пояснити недостатнім або нераціональним освітленням, а в 20 % воно сприяло виникненню травм. Врешті, погане освітлення може призвести до професійних захворювань, наприклад, таких як робоча міопія (короткозорість), спазм акомодатції [10, 12].

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, має бути передбачена система виробничого освітлення. Залежно від джерела світла, виробниче освітлення може бути: природним, що створюється прямими сонячними променями та розсіяним світлом небосхилу; штучним, що створюється електричними джерелами світла та суміщеним, при якому недостатнє за нормами природне освітлення доповнюється штучним.

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 і час відпочинку, надаватись технологічні та гігієнічні перерви, створюватись позитивний моральний клімат у трудовому колективі, не припустимі грубі показові «виволочки» та некоректні зауваження від керівництва до підлеглих.

Для зменшення забруднення повітряного середовища шкідливими хімічними та біологічними речовинами та захисту працюючих, пропонуються загальні заходи та засоби, а також заходи попередження.

Під заходами попередження розуміються:

- проведення вступних, первинних, повторних, позапланових та цільових інструктажів з техніки безпеки; регулярні навчання і перевірка знань з ОП;
- використання попереджувальних написів, плакатів, кольорів та знаків безпеки.

Серед загальних заходів та засобів можна виділити:

- вдосконалення технологічних процесів та устаткування (застосовування замкнутих технологічних циклів, неперервних технологічних процесів, мокрих способів переробки пиломатеріалів тощо);

- повне вилучення шкідливих речовин з технологічних процесів або заміна шкідливих речовин менш шкідливими (наприклад, свинцеві білила можуть бути замінені на цинкові, метиловий спирт – іншими спиртами, органічні розчинники для знежирювання – миючими розчинами на основі води і т. п.);

- автоматизація і дистанційне керування технологічними процесами та обладнанням, що виключає безпосередній контакт працюючих з шкідливими речовинами;

- герметизація виробничого устаткування, робота технологічного устаткування під розрідженням, локалізація шкідливих виділень за рахунок місцевої вентиляції;

- підтримка нормального функціонування систем опалення, загальнообмінної вентиляції, кондиціонування повітря, очистки викидів в атмосферу;

- попередні та періодичні медичні огляди робітників, які працюють у шкідливих умовах, профілактичне харчування, дотримання правил особистої гігієни;

- контроль за вмістом шкідливих речовин в повітрі робочої зони;

- використання працівниками спецодягу, спецвзуття та ЗІЗ (ватно-марлевих пов'язок, респіраторів, протигазів, захисних окулярів тощо).

Для забезпечення нормального робочого режиму, видалення небезпечних та шкідливих речовин на робочих місцях і у виробничих приміщеннях, необхідно розрахувати оптимальні системи штучної вентиляції.

А.4 Розрахунок системи штучної вентиляції цеху, де відбувається

експлуатація барабанного гранулятора-сушарки при виробництві мінеральних добрив

Для своєчасного виведення шкідливих речовин, тепла, що виділяється під час технологічних процесів на виході барабанного гранулятора-сушарки при виробництві мінеральних добрив, необхідно розрахувати систему штучної вентиляції.

Під вентиляцією розуміють сукупність заходів та засобів, призначених для забезпечення на постійних робочих місцях та зонах обслуговування виробничих приміщень метеорологічних умов та чистоти повітряного середовища, що відповідають гігієнічним та технічним вимогам. Основне завдання вентиляції – вилучити із приміщення забруднене або нагріте повітря та подати свіже [11].

Вентиляція класифікується за такими ознаками [10, 12]:

- за способом переміщення повітря – природна, штучна (механічні та суміщена (природна та штучна одночасно);
- за напрямком потоку повітря – припливна, витяжна, припливно-витяжна;
- за місцем дії – загальнообмінна, місцева, комбінована.

Штучна (механічна) вентиляція, на відміну від природної, дає можливість очищувати повітря перед його викидом в атмосферу, вловлювати шкідливі речовини безпосередньо біля місць їх утворення, обробляти припливне повітря (очищувати, підігрівати, зволожувати), більш цілеспрямовано подавати повітря в робочу зону. Окрім того, механічна вентиляція дає можливість організувати повітрязабір в найбільш чистій зоні території підприємства і навіть за її межами.

Штучна вентиляція забезпечує створення необхідного мікроклімату та чистоти повітряного середовища у всьому об'ємі робочої зони приміщення. Вона застосовується для видалення надлишкового тепла при відсутності токсичних виділень, а також у випадках, коли характер технологічного процесу та особливості виробничого устаткування виключають можливість використання місцевої витяжної вентиляції.

Загальнообмінна вентиляція. Розрізняють чотири основні схеми організації повітрообміну при загальнообмінній вентиляції: згори вниз, згори вгору, знизу вгору, знизу вниз (*рис. А.1*).

Схеми згори вниз (*рис. А.1, а*) та згори вгору (*рис. А.1, б*) доцільно застосовувати у випадку, коли припливне повітря в холодний період року має температуру, нижчу за температуру приміщення. Припливне повітря перш ніж досягти робочої зони нагрівається за рахунок повітря приміщення. Інші дві схеми (*рис. А.1, в* та *рис. А.1, г*) рекомендується використовувати тоді, коли припливне повітря в холодний період року підігрівається і його температура вища за температуру внутрішнього повітря.

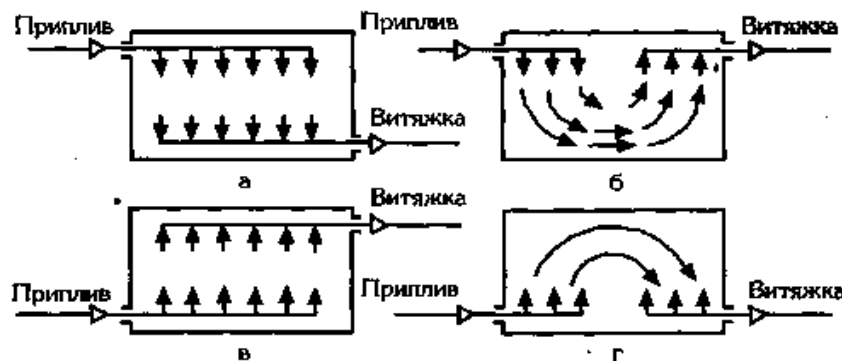


Рисунок А.1 – Схеми організації повітрообміну при загальнообмінній вентиляції

Якщо у виробничих приміщеннях виділяються гази та пари з густиною, що перевищує густину повітря (наприклад, пари кислот, бензину, гасу), то загальнообмінна вентиляція повинна забезпечити видалення 60% повітря з нижньої зони приміщення та 40% – з верхньої.

Якщо густина газів менша за густину повітря, то видалення забрудненого повітря здійснюється у верхній зоні.

Припливна вентиляція. Схема припливної механічної вентиляції (*рис. А.2*) включає: повітрозабірний пристрій 1; фільтр для очищення повітря 2; повітронагрівач (калорифер) 3; вентилятор 5; мережу повітроводів 4 та припливні патрубки з насадками 6. Якщо немає необхідності підігрівати припливне повітря, то його пропускають безпосередньо у виробничі приміщення

через обвідний канал 7.

Повітрозабірні пристрої необхідно розташовувати в місцях, де повітря не забруднене пилом та газами. Вони повинні знаходитись не, нижче 2 м від рівня землі, а від викидних каналів витяжної вентиляції по вертикалі – нижче 6 м і по горизонталі – не ближче 25 м.

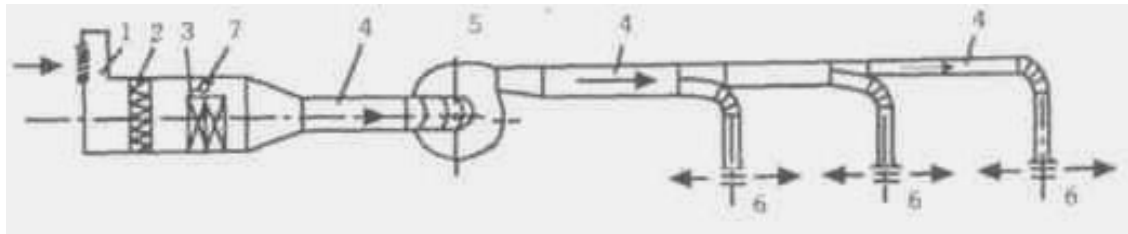


Рисунок А.2 – Схема припливної вентиляції

Припливне повітря подається в приміщення, як правило, розсіяним потоком для чого використовуються спеціальні насадки.

Витяжна та припливно-витяжна вентиляція. Витяжна вентиляція (рис. А.3) складається із очисного пристрою 1, вентилятора 2, центрального 3 та відсмоктуючих повітроводів 4.

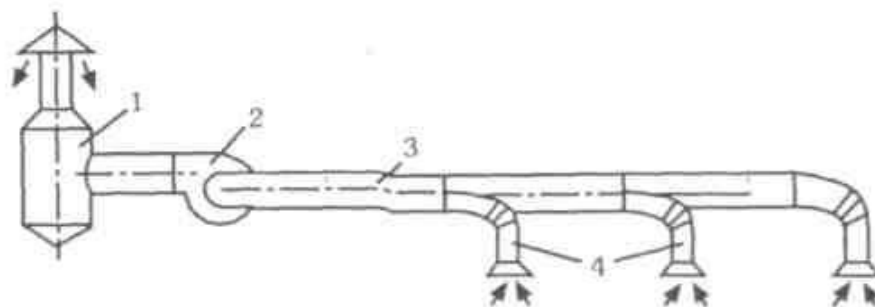


Рисунок А.3 – Схема витяжної вентиляції

Повітря після очищення необхідно викидати на висоті не менше ніж 1 м над гребенем даху. Забороняється робити викидні отвори безпосередньо у вікнах. В умовах промислового виробництва найбільш розповсюджена припливно-витяжна система вентиляції із загальним припливом в робочу зону та місцевою витяжною шкідливих речовин безпосередньо з місць їх утворення.

У виробничих приміщеннях, де виділяється значна кількість шкідливих газів, парів, пилу витяжка повинна бути на 10 % більшою ніж приплив, щоб

шкідливі речовини не витіснялись у суміжні приміщення з меншою шкідливістю.

В системі припливно-витяжної вентиляції можливе використання не лише зовнішнього повітря, але й повітря самих приміщень після його очищення. Таке повторне використання повітря приміщень називається рециркуляцією і здійснюється в холодний період року для економії тепла, витраченого на підігрівання припливного повітря. Однак можливість рециркуляції обумовлюється цілою низкою санітарно-гігієнічних та протипожежних вимог.

Для розрахунку штучної вентиляції в цеху, де відбувається експлуатація барабанного гранулятора-сушарки при виробництві мінеральних добрив, будемо застосовувати комбіновану штучну вентиляцію. Оскільки в технологічних процесах виділяється значна кількість теплоти, ми будемо застосовувати всмоктувальну панель для відводу тепла, а для вилучення шкідливих речовин застосуємо витяжний зонт (*рис. А.4*).

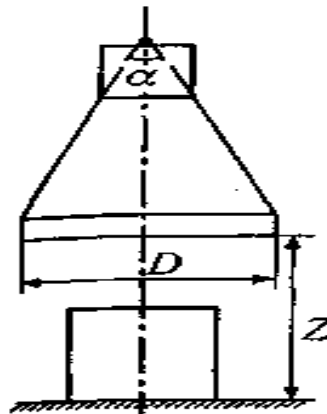


Рисунок А.4 – Витяжний зонт

Розрахунок проведемо у відповідності з методикою, наведеною у [2].

Початкові дані:

– розміри зонту: $a = 1,5 \text{ м}^2$;

$b = 0,8 \text{ м}^2$;

$l = 1,4 \text{ м}$;

– $H = 0,7 \text{ м}$;

– $Q = 69961 \text{ ккал/год.}$

Розрахунок.

Кількість повітря, що вилучається витяжним зонтом визначаємо за формулою:

$$L = a \cdot b \cdot v \cdot 3600, \quad (\text{A.1})$$

де v – швидкість повітря, що вилучається, в площині перетину по краю зонта, м/с.

Середня швидкість руху забрудненого потоку повітря в приймальному отворі зонта повинна бути :

$v_{\text{сер}} = 1,05 \dots 1,25$ м/с – зонт відкритий з 4-х сторін;

$v_{\text{сер}} = 0,9 \dots 1,05$ м/с – зонт відкритий з 3-х сторін;

$v_{\text{сер}} = 0,75 \dots 0,9$ м/с – зонт відкритий з 2-х сторін;

$v_{\text{сер}} = 0,5 \dots 0,75$ м/с – зонт відкритий з однієї сторони.

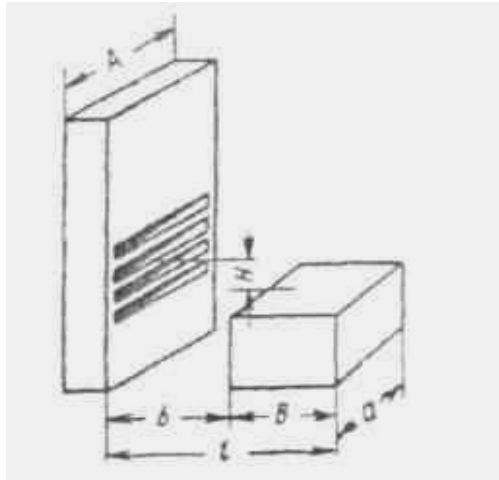


Рисунок А.5 – Схема всмоктувальної панелі

Обравши мінімальний варіант, можемо з виразу (А.1) отримати:

$$L = 1,5 \cdot 0,8 \cdot 0,5 \cdot 3600 = 2160 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Об'єм повітря , що вилучається панеллю, визначаємо за формулою:

$$L_{II} = c \cdot Q^{\frac{1}{3}} \cdot (H + B)^{\frac{5}{3}}, \quad (\text{A.2})$$

де c – коефіцієнт пропорційності, що залежить від конструкції панелі та її розташування відносно джерела виділення тепла;

Q – кількість тепла, яка виділяється джерелом, ккал/год.;

H – відстань від верхньої площини джерела до центру всмоктування панелі, м;

B – ширина джерела, м.

Коефіцієнт c для панелі без екрана:

$$c = 240 \left(\frac{l}{H + B} \right)^{\frac{2}{3}}. \quad (\text{A.3})$$

Підставивши значення величин, одержуємо:

$$c = 240 \cdot \left(\frac{1,4}{0,7 + 1} \right)^{\frac{2}{3}} = 212.$$

Об'єм повітря, що вилучається панеллю:

$$L_{II} = 212 \cdot 69961^{\frac{1}{3}} \cdot (0,7 + 1)^{\frac{5}{3}} = 21150 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Загальний об'єм повітря, що вилучається:

$$L_3 = L + L_{II}. \quad (\text{A.4})$$

$$L_3 = 2160 + 21150 = 23310 \text{ м}^3/\text{год.}$$