

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
«__» _____2023 р.

ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти

на тему
«Система автоматичного регулювання температури
зерна в силосах елеватора»

Виконав здобувач вищої освіти
IV курсу групи АК-19
ОПП «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
_____Павло ЛОЗІНСЬКИЙ
«__» _____2023 р.

Керівник проекту
доцент, канд.техн.наук
_____Олександр ДІДИК
«__» _____2023 р.

Рецензент
_____Петро ПЛІШКОВ
«__» _____2023 р.

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра автоматизації виробничих процесів

Рівень вищої освіти бакалавр

Галузь знань 15 Автоматизація та приладобудування

Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Дідик О.К.

“ ” _____ 20__ року

**ЗАВДАННЯ НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Лозінського Павла Сергійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Система автоматичного регулювання температури зерна в силосах елеватора

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

3. Строк подання студентом роботи до захисту 31.05.2023 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи Розробити систему автоматичного регулювання температури зерна в силосах елеватора. Провести огляд технологічного процесу зберігання зерна в силосах елеватора; Розробити структурну схему системи автоматичного регулювання, вибір та аналіз її елементів; Проектування системи автоматичного регулювання; Практична реалізація системи автоматичної регулювання.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		завдання ви- дав	завдання прийняв

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Огляд технології при зберіганні зерна</i>	15.04.23	
2.	<i>Розробка структурної схеми системи автоматичного регулювання, вибір та аналіз її елементів</i>	30.04.23	
3.	<i>Проектування системи автоматичного регулювання</i>	15.05.23	
4.	<i>Практична реалізація системи автоматичного регулювання</i>	25.05.23	

Дата видачі завдання _____

Керівник роботи _____ О.К. Дідик «___» _____ 2023 р.

Завдання прийнято до виконання

Здобувач _____ П.С. Лозінський «___» _____ 2023 р.

Анотація

Випускна кваліфікаційна робота присвячена проблемі якості зберігання зернової маси, що зберігається в силосах елеватора, за допомогою активного вентилявання охолодженим повітрям. В роботі розроблена структурна схема системи автоматичного регулювання та проведений синтез регуляторів. В результаті аналізу системи обрано регулятор, який давав найкращу якість підтримання температури. Для обраного оптимального 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 управління виконавчим механізмом.

Також створена модель системи автоматичного регулювання в пакеті Simulink, за допомогою якої досліджено вплив вологості на якість регулювання температури зернової маси в силосі елеватора.

Summary

Graduation qualification work is devoted to the problem of the quality of storage of grain mass stored in silos of the elevator, with the help of active ventilation with cooled air. In the work, the structural diagram of the automatic regulation system was developed and the synthesis of regulators was carried out. As a result of the system analysis, a regulator was selected that gave the best quality of temperature maintenance. A software implementation algorithm was developed for the selected optimal regulator, and a basic electrical circuit was developed based on a single-chip microcontroller with appropriate information input and output devices, for connecting sensors and controlling the executive mechanism.

A model of the automatic regulation system was also created in the Simulink package, with the help of which the influence of humidity on the quality of temperature regulation of the grain mass in the elevator silo was investigated.

Зміст

Вступ	2
1 Опис технології при зберіганні зерна	3
1.1 Опис елеватора	4
2 Розробка структурної схеми системи автоматичного регулювання	8
2.1 Об'єкт управління	8
2.2 Вибір датчика	15
2.3 Вибір вентилятора.....	18
2.4 Вибір виконавчого механізму.....	20
2.5 Структурна схема системи автоматичного регулювання.....	22
3 Проектування системи автоматичного регулювання.....	24
3.1 Синтез системи охолодження зерна в бункері елеватора	24
3.2 Аналіз якості вирішення задачі регулювання.....	31
4 Практична реалізація системи автоматичної регулювання.....	37
4.1 Визначення періоду дискретизації.....	37
4.2 Визначення Z-перетворення передаточної функції регулятора	39
4.3 Опис принципової схеми регулятора	41
4.4 Дослідження впливу вологості на температуру зернової маси	49
Висновки	56
Список літератури.....	57

Вступ

В сучасних умовах ринкової економіки постає питання не тільки вирощування, але і забезпечення умов для якісного зберігання зерна, що дає можливість довше зберігати якісні показники зернової маси, і збувати продукцію по вигідним цінам, а також робити запаси та довше зберігати їх життєздатність для проростання.

Для ефективного зберігання зерна необхідно відслідковувати його температуру і вологість. На зберігання зерно поступає просушене із вологістю не більше 14%, і зміна вологості при низьких температурах зберігання відбувається дуже повільно, необхідно ретельно контролювати температуру зернової маси, і не давати їй підніматися вище норми, щоб не викликати процесу самозігрівання при якому, швидко зростає температура і вологість зерна, а значить воно починає швидко псуватись.

Для досягнення даної мети в роботі розробляється система автоматичного регулювання температури, а саме охолодження зернової маси в силосі елеватора шляхом активного вентилявання охолодженим повітрям та контролю вологості зерна.

1 Опис технології при зберіганні зерна

1.1 Опис елеватора

Запроектовані будівлі і споруди призначені для прийому і очищення зерна, зберігання та подачі його у виробничий корпус переробки насіння.

Основні технічні дані сховища:

- вантажопідйомність автомобілерозвантажувача - 15 т.
- продуктивність обладнання по очищенню зерна - 50 т/год.;

Виробничі будівлі і споруди:

- приймальний пристрій зерна з автотранспорту ;
- відділення очищення зерна;
- силоси металеві для зберігання зерна: - 476,1 х 3 м³;
- 84,8 х 4 м³;
- 43,87 м³;
- норійні башти;
- операторська.

Технологічний процес роботи сховища складається із наступних режимів:

- завантаження сховища;
- вивантаження зерна;

Завантаження сховища

Зерно до сховища доставляється автомобільним транспортом. Після проходження лабораторного контролю та отримання позитивного висновку зерно транспортується до автомобілерозвантажувача.

За допомогою автомобілерозвантажувача проводиться вивантаження зерна з автотранспорту в приймальний бункер.

Контроль над процесом прийому зерна проводиться машиністом автомобілерозвантажувача.

З приймального бункера зерно поступає на норію, що подає зерно на комплексний барабанний сепаратор.

Сепаратор призначений для видалення із зернової маси легких, дрібних і великих домішок відокремлюваних повітрям і решетами.

Після очищення зерно самопливом поступає в бункер очищеного зерна, з якого шляхом відкриття ручної засувки проводиться завантаження автотранспорту, або після відкриття засувки з електроприводом зерно по самопливу поступає на норію.

Норія через трубу поворотну, по самопливам направляє зерно в силоси металеві, або в автотранспорт.

Контроль за завантаженням насіння здійснюється за допомогою датчиків рівня.

Вивантаження зерна

Вивантаження зерна з силосів виконується шляхом відкриття ел. засувки; через перекидний клапан на стрічкові конвеєри. Стрічковий конвеєр транспортує зерно на ваги-дозатор порційні з яких через бункер підваговий на норію, якою по самопливу подає зерно в приймальний бункер виробничого корпусу переробки насіння;

Стрічковий конвеєр, транспортує зерно на стрічковий конвеєр, який транспортує його на стрічковий конвеєр, котрий через перекидний клапан, подає зерно на норію, або на стрічковий конвеєр. Стрічковий конвеєр транспортує зерно через перекидний клапан на стрічкові конвеєри. Вивантаження зерна з силосів виконується шляхом відкриття ел. засувки, на стрічковий конвеєр, який транспортує його на стрічковий конвеєр.

Вивантаження зерна з силосів, виконується шляхом відкриття електричних засувки; на стрічковий конвеєр.

Також передбачена можливість перевантаження зерна з силосу в силос.

Для створення нормальних умов праці обслуговуючого персоналу згідно "Правил техніки безпеки і виробничої санітарії на підприємствах

зберігання і переробки зерна" і для забезпечення нормальної роботи технологічного устаткування проектом передбачене створення аспіраційної мережі.

Пил, що відводиться вентилятором аспіраційної мережі АМ -1 від сепаратора уловлюється циклонами і накопичується в бункері для дрібних відходів.

Для знепилювання аспіраційного повітря застосовані батарейні циклони 4ББЦ з коефіцієнтом очищення - 98%.

Система технологічної аспірації блокуються з відповідними технологічними лініями. Блокування електродвигунів здійснюється в напрямі зворотного ходу технологічного процесу з метою запобігання завалам і підпорам обладнання.

При непрацюючій аспіраційній мережі робота обладнання заборонена та блокуванням виключена.

Електродвигун вентилятора аспіраційної мережі блокується з електродвигунами обладнання, що знепилюється, таким чином, що пуск вентилятора здійснюється з випередженням в 15 - 20 с. від пуску обладнання, а зупинка вентилятора відбувається через 20 - 30 с. після зупинки обладнання.

Все технологічне обладнання, самопливний транспорт і повітропроводи аспіраційної мережі ретельно герметизується гумовими прокладками.

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

Крупні відходи, що містять в основному мінеральні і органічні домішки, вивозяться в місця узгоджені з санстанцією.

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

2 Розробка структурної схеми системи автоматичного регулювання

В даній роботі об'єктом управління є зернова маса, яка знаходиться в силосі елеватора, для регулювання температури необхідно знати залежність температури зерна від температури міжзернового повітря, котрим і буде проводитись охолодження зернової. Для вимірювання температури необхідно вибрати термодатчик який зможе надавати інформацію про стан температури по всьому об'єму силосу, так як температура в зерновій масі може розподілятися не рівномірно, і не залежати від висоти і віддаленості від центра силосу. Температуру зернової маси необхідно лише зменшувати [1], для її охолодження використовуємо процес аерації, для застосування якого необхідно обрати вентилятор, для продування зернової маси, та холодильну установку, для зменшення температури повітря, котрим проводиться активне вентилявання.

2.1 Об'єкт управління

Основні передумови до ідентифікації сільськогосподарських багатомірних об'єктів керування, в основі функціонування яких лежать процеси тепло- і масообміну.

Сільськогосподарські технологічні процеси як об'єкти автоматизації являють собою складні багатоемнісні системи з багатьма взаємозалежними параметрами. Процеси, що відбуваються в сільськогосподарських об'єктах керування, досить різноманітні по своїй фізико-біологічній природі, призначенню й апаратурному оформленню й, як правило, досить складні. У цих умовах важливо виділити класи об'єктів, що володіють певними рисами. Це дозволить розробити загальні для даного класу об'єктів методи й алгоритми дослідження, а також загальні прийоми побудови систем керування.

У сучасному сільськогосподарському виробництві важливе місце займають об'єкти, в основі функціонування яких лежать процеси тепло- і масообміну. Це різного роду сушильні камери, тваринницькі приміщення з регульованим мікрокліматом, сховища сільськогосподарської продукції й ін. Незважаючи на їх різне функціональне призначення й розходження в апаратурному оформленні, всім перерахованим сільськогосподарським об'єктам властиві загальні риси - наявність двох взаємозалежних температурно-вологісних параметрів, що характеризують їхню технологічну особливість, і необхідність підтримувати заданий рівень тепло- і масообмінних процесів.

Перераховані в спільному різнохарактерні сільськогосподарські об'єкти керування можна об'єднати в єдиний клас і досліджувати їх статичні й динамічні властивості, щоб виробити єдиний підхід до їхньої автоматизації.

Слід зазначити, що при дослідженні багатомірних об'єктів керування із взаємозалежними параметрами виникає завдання - визначити не тільки статичні й динамічні властивості по окремих їхніх контурах керування, але й виявити ступінь і форму взаємозв'язку між керованими величинами.

У зв'язку із пред'явленням усе більше високих вимог до керування сільськогосподарськими технологічними процесами проблема ідентифікації стає винятково важливою. Не можна забезпечити якісне керування системою, якщо її динамічні і статичні характеристики невідомі з достатньою точністю. Поряд з експериментальними методами дослідження статичних і динамічних властивостей тепло- і масообмінних процесів як об'єктів управління широко застосовуються різні аналітичні методи дослідження, основані на різних підходах до форми завдання ідентифікаційних моделей (диференціальні рівняння, різницеві рівняння, передатні функції, функції ваги, частотні характеристики, градієнтні вирази й ін.). Кожний з них має специфічні особливості й свою область

застосування. Це, однак, не означає, що на сучасному рівні ідентифікація розглядається як набір готових рецептів для різних типів сільськогосподарських об'єктів керування. Існує кілька характерних підходів, для яких необхідні різні методи дослідження статичних і динамічних сільськогосподарських об'єктів управління.

З експериментальних методів дослідження статичних і динамічних властивостей даного класу сільськогосподарських об'єктів керування найбільше поширення одержали методи з використанням східчастої, імпульсної й синусоїдальної форм вхідних сигналів. Останнім часом завдяки своїм широким можливостям різні регресійні методи також успішно знаходять застосування в інженерній практиці для ідентифікації сільськогосподарських об'єктів керування, пов'язаних з функціонуванням тепло- і масообмінних процесів.

Переходячи до процедури ідентифікації, коротко зупинимося на деяких особливостях динамічних властивостей досліджуваного класу багатомірних сільськогосподарських об'єктів керування. Для цього виділимо три характерні його групи, що розрізняються насамперед механізмом опису теплообмінних процесів.

До першої групи віднесемо об'єкти із глибоким зв'язком і взаємовпливом тепло- і влагобмінних процесів. До цієї групи віднесемо, наприклад, сушильні камери, де особливо яскраво проявляються взаємозв'язки й взаємовплив тепло- і масобмінних процесів на всіх стадіях процесу сушіння сільськогосподарських культур.

Особливістю об'єктів другої -групи, куди віднесені сховища сільськогосподарських продуктів, є низька інтенсивність масобмінних процесів, що дозволяють певною мірою зневажити впливом маси на теплообмін.

У третю групу включені об'єкти із внутрішніми джерелами тепла й маси (тваринницькі приміщення).

Відповідно до вищевикладеного дослідження динамічних властивостей розглянутого класу багатомірних сільськогосподарських об'єктів керування проведемо для кожної виділеної групи окремо, з огляду на при цьому специфічні особливості механізму протікання процесів тепло- і масобміну.

При цьому як характерні приклади сільськогосподарських багатомірних об'єктів першої групи розглянемо технологічний процес сушіння зерна в шахтній камері, процес активного вентилявання зерна.

Дослідження статичних і динамічних властивостей процесу активного вентилявання зерна як об'єкта автоматичного керування.

Слід зазначити, що технологічний процес активного вентилявання зерна за кілька десятиліть перетерпів значні зміни. Спочатку обмежувалися природним обдувом зернового насипу. Потім стали застосовувати повітропідігрівні й охолоджувальні рефрижераторні установки. З'явилася можливість використання їх для підігріву й охолодження вентиляваного повітря, що перетворило вентилявання в ефективний засіб сушіння й консервації холодом, що не залежить від погодних умов зовнішнього середовища.

Розглянемо спочатку основні особливості процесу вентилявання з метою сушіння насінного зерна, де особливо яскраво проявляються його позитивні якості, тому що насінний матеріал досить чутливий до зміни температурного режиму, а установки активного вентилявання, як буде показано нижче, забезпечують стабільний сприятливий режим сушіння.

Сушіння зерна активним вентиляванням ґрунтується на принципі гігроскопічної рівноваги між вологістю зерна й відносною вологістю вентиляваного повітря. В умовах динамічної рівноваги відносної вологості повітря, рівної 62...70%, відповідає вологість зерна порядку 13...14%. У зв'язку із цим у вентиляваних бункерах як сушильний агент використовують зовнішній або трохи підігріте повітря.

При дослідженні статичних і динамічних властивостей процесу активного вентилявання зерна в якості базового використаємо аналітичний метод. Адекватність отриманої математичної моделі буде надалі підтверджуватися експериментальним шляхом на діючих установках активного вентилявання зерна.

При аналізі процесу активного вентилявання зерна зроблений ряд допущень, що значно спрощують процес дослідження його статичних і динамічних властивостей. Зокрема, прийнято, що волога в зерні перебуває в рідкому стані; випар вологи підкоряється закону Дальтона; тепло- і вологообміну відбувається тільки між сушильним агентом і зерном; температурний градієнт усередині окремих зерен малий, і їм можна зневажити; теплообмін між вентиляльованим повітрям і зерном здійснюється шляхом конвекції.

Використовуючи балансові співвідношення, що описують нестационарний процес тепло- і масообміну в шарі вентиляльованого зерна, отримаємо наступну систему диференціальних рівнянь :

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

де a_v - коефіцієнт теплообміну; S_v - питома поверхня матеріалу, що бере участь у процесі тепло- і масообміну; ε - шпаруватість зернової маси; γ_B - щільність повітря; c_B - питома теплоємність повітря; ν - швидкість повітряного потоку; x - товщина шаруючи вентиляльованого зерна; Θ, t - температура зерна й повітря; r - теплота паротворення; c_M - питома теплоємність матеріалу; γ_M - щільність матеріалу; β_v - коефіцієнт випару; d - вологовміст повітря; p_M, p_B - парціальний тиск насиченої водяної пари в

прикордонному шарі матеріалу й у навколишнім повітрі; ω - вологість зерна;
 τ - час.

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

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

Відомо, що швидкість вологовіддачі вологого матеріалу визначається різницею парціальних тисків пари в поверхні матеріалу й у навколишнім повітрі [9]. У свою чергу, парціальний тиск у поверхні вологого матеріалу являє собою складну нелінійну функцію температури й вологомісткості зерна. Тому наведена вище система диференціальних рівнянь нелінійна.

Однак для ряду випадків залежність парціального тиску пари в поверхні матеріалу з достатньою для інженерних розрахунків точністю, може бути апроксимована лінійною залежністю наступного вигляду:

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

де, a , b , c – постійні коефіцієнти

в діапазоні зміни $d=2..20$ г/кг сухого повітря коефіцієнт пропорційності складає $e=1.13$.

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

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

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

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

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

пари біля поверхні матеріалу;

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

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

повітрі;

$d^* = \frac{r}{c_B(t_1 - \Theta_1)} d$ - відносна вологовміст кість повітря;

Отримуємо наступну систему рівнянь:

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

Після розв'язання і перетворення даної системи рівнянь отримаємо передатні функції процесу активного вентилявання зерна [2].

Для спрощення розрахунків передаточні функції були спрощені і представлені у вигляді аперіодичних ланок

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

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

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

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

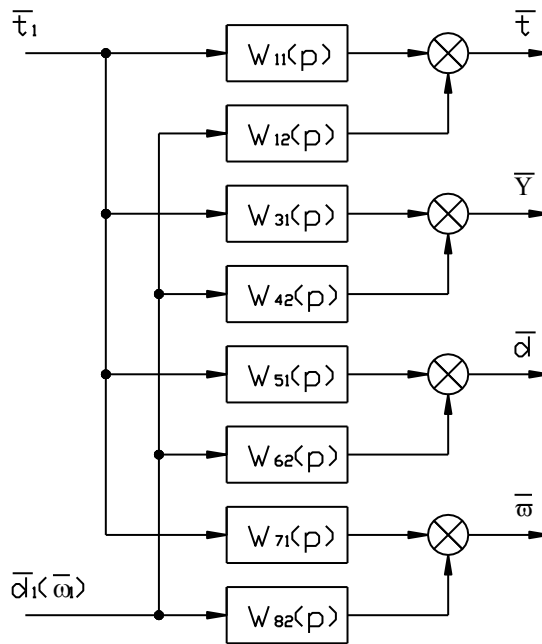


Рисунок 2.1 - Структурна схема процесу активного вентилявання зерна як об'єкта управління:

t_1 , φ_1 – температура і відносна вологість повітря, яке поступає в установку;

Θ , ω – температура і вологість вентиляємої зернової маси.

2.2 Вибір датчика

Цифрова термopідвіска ТУР-01 призначена для безперервного виміру температури й рівня сипучих речовин в елеваторах, а також напільних зерносковищах. Прилад може встановлюватися замість існуючих термopідвісок УДКТЭ, ДКТЭ-4МГ, М-5, МАРС-1500, ТП-015, а також для установки на новоспоруджені елеватори та інші технологічні ємності в складі систем автоматизованого керування (САК).

Термopідвіска ТУР-01 одночасно з виміром температури продукту, виконує функції рівнеміра - вимірює поточний рівень сипучого середовища.

Термopідвіска складається з механічного й, електрично об'єднаних, локального контролера й чутливого елемента (ЧЕ). ЧЕ являє собою трубчасту оболонку з нержавіючої сталі 12Х18Н10Т або гнучку пластикову оболонку, армовану двома сталевими тросами.

Усередині оболонки розташований вимірювальний шлейф із датчиками температури (установлені з інтервалом в 1 м). Термодатчики здійснюють вимір температури контрольованої речовини в межах окремих зон і виробляють кодовані вимірювальні сигнали.

Чутливий елемент одночасно є ємнісним датчиком рівня. Усередині оболонки по всій її довжині перебувають електрода-обкладки вимірювального конденсатора. Ємність датчика змінюється пропорційно рівню заповнення бункера за рахунок розходження діелектричної проникності повітря й контрольованої сипучої речовини, у яке занурений чутливий елемент.

Локальний контролер по черзі опитує датчики температури, зберігає лічені значення й видає їх по запиті від зовнішньої ЕОМ через інтерфейсну лінію зв'язку RS485.

Функціонування термopідвіски в складі САК забезпечується в комплекті з наступними технічними засобами:

- персональним комп'ютером, сумісним з IBM PENTIUM III;
- перетворювачем інтерфейсу RS232/RS485;
- ретранслятором інтерфейсу RS485 (на кожні 32 пристрої понад перший32);
- програмним забезпеченням верхнього рівня.

Таблиця 2.1 - Технічні характеристики датчика

Напруга живлення	+18...36 В або 14...27 В, 50 Гц
Споживана потужність, не більше	3 ВА
Діапазон виміру:	
температури середовища	-40 °С ... +70 °С
рівня середовища	до 30 метрів
Похибка	
виміру температури	±1 °С

виміру рівня	±1%
Вихідний цифровий сигнал	RS-485
Умови експлуатації:	
температура навколишнього середовища	-30 °C ... +50 °C
відносна вологість	до 95% (при 35 °C)
вібраційні навантаження	5...80 Гц, 1 g
Ступінь захисту забезпечена оболонкою	IP65



Рисунок 2.2 - Зовнішній вигляд датчика

Передатною функцією датчика є $W_d = K_d$, сигнал датчика є цифровим, а не аналоговим приймаємо $K_d = 1$.

2.3 Вибір вентилятора

На основі об'єму зерна, яке необхідно охолоджувати в процесі зберігання, був обраний центробіжний вентилятор ВЦ-14-46-2.5 з двигуном постійного струму IGG5-108.

Відцентрові вентилятори ВЦ 14-46 виготовляють із вуглецевої сталі й призначені для переміщення повітря й газових сумішей, агресивність яких стосовно вуглецевих сталей звичайної якості не вище агресивності повітря температурою $+80^{\circ}\text{C}$, не утримуючих липких речовин, волокнистих матеріалів, а також пилу й інших твердих домішок у кількості не більше 150 мг/м^3 .

Центробіжні вентилятори ВЦ 14-46В призначені для переміщення газо-пароповітряних вибухонебезпечних сумішей ПА, ПВ категорій, що не викликають прискореної корозії вуглецевої сталі й алюмінію (швидкість корозії не вище $0,1 \text{ мм у рік}$) зі змістом пилу й інших твердих домішок не більше $0,1 \text{ г/м}^3$ при відсутності вибухових і липких речовин і волокнистих матеріалів і температурою не більше 80°C . Вентилятори не застосовні для переміщення газо-пилеповітряних сумішей від технологічних установок, у яких вибухонебезпечні речовини нагріваються вище температури їхнього samozapalювання або перебувають під надлишковим тиском.

Відцентрові вентилятори ВЦ 14-46 застосовуються в стаціонарних системах опалення й кондиціонування повітря й вентиляції виробничих, суспільних і житлових приміщеннях.

Вентилятори ВЦ 14-46 розташований в спіральному кожусі лопаткове (робоче) колесо, при обертанні якого повітря, що попадає в канали між його лопатками, рухається в радіальному напрямку до периферії колеса, стискується й під дією відцентрової сили відкидається в спіральний кожух і далі направляється в нагнітальний отвір. Робоче колесо являє собою пустотілий циліндр, у якому по всій бічній поверхні, паралельно осі обертання, установлені на рівних відстанях лопатки. Робоче колесо

вентилятора ВЦ-14-46 має 34 загнуті вперед лопатки, установлюється на валу електродвигуна й стопориться болтом.

Вентилятори ВЦ-14-46 мають праве й ліве обертання.

Корпус вентилятора ВЦ-14-46 спіральний і може бути встановлений у кожному з 6 положень через 45°.

Габаритні і з'єднувальні розміри вентиляторів ВЦ-14-46

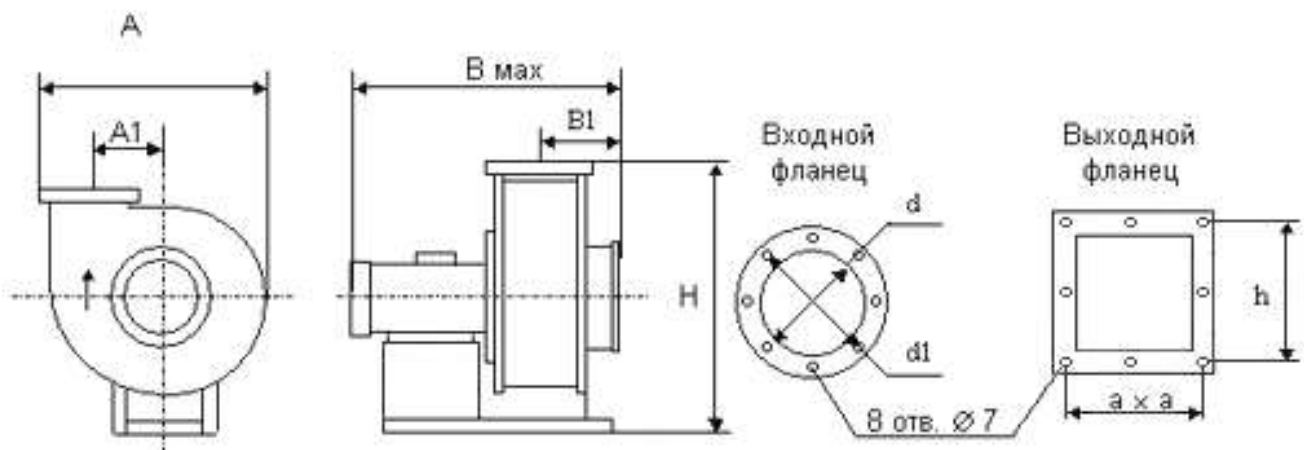


Рисунок 2.3 – Зовнішній вигляд вентилятора

Таблиця 2.2 – Габаритні розміри вентилятора

	A	Bmax	H	A1	B1	d	d1	a	h
ВЦ-14-46-2.5	479	466	512	160	140	250	280	17	205

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

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

Таблиця 2.4 - Технічні характеристики двигуна AIP100L2

Номінальна частота обертання валу, об/хв	1500
Синхронна частота обертання, об/хв	3000
Вихідна потужність, кВт	5,5
Вихідний момент H^*m	8,5-10,3
Струм статора, А	10,7
ККД	88
Коефіцієнт потужності	0,89
Іпуск./Іном.	7,5
Маса (кг)	31,5



Рисунок 2.4 – Зовнішній вигляд двигуна

2.4 Вибір виконавчого механізму

У системі кондиціювання повітря охолодження проточного повітря вимагає найбільшого споживання енергії в порівнянні з іншими способами повітряної обробки.

У схемі холодильної установки передбачені зміни температури кипіння в діапазоні 275...280 К и температури конденсації в діапазоні 303...309 К. Схема досліджуваної холодильної установки зображена на рис. 2.5.

Типова холодильна установка являє собою технічну систему, для дослідження якої застосуємо підхід, що опирається на використання термодинамічного потенціалу процесів перетворення енергії в системі. Для оцінки енерго-ефективності устаткування холодильної установки застосований узагальнений показник енергетичної ефективності або ексергетичний КПД (η_e).

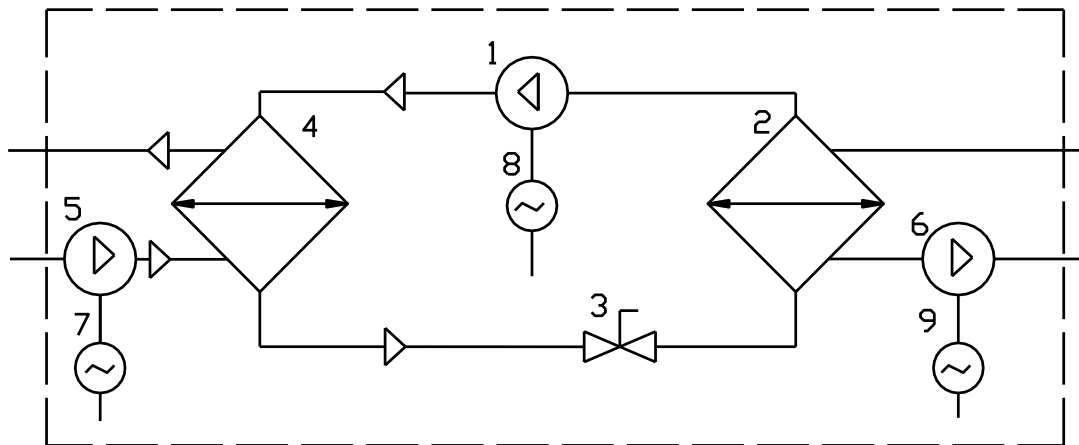


Рисунок 2.5 – Схема одноступінчастої холодильної установки

- 1 – компресор;
- 2 – випаровувач;
- 3 – дросуючий пристрій;
- 4 – конденсатор;
- 5 – насос охолоджуючої води;
- 6 – росільний насос;
- 7, 9 - електроприводи насосів;
- 8 – електропривод компресора

Застосування ексергетического аналізу дозволяє вибрати енергетично ефективний режим роботи автоматизованої холодильної установки шляхом техніко- і термодинамічного порівняння різних варіантів з наступною термодинамічною оптимізацією режимів роботи установки.

При проведенні термодинамічного аналізу використався статичний рівень рішення завдання, при якому система розглядалася на кожному етапі як перебуває в стаціонарному стані.

Ексергетичені втрати в холодильній установці обумовлені рядом причин. До основних факторів, що впливають на η , відносять: необоротні теплообміни між холодоагентом і робочим агентом у випарнику, а також між холодоагентом і навколишнім середовищем підвищеного потенціалу в конденсаторі; стиск у компресорі перегрітої пари холодоагенту по необоротній політропі замість оборотного стиску пари в ідеальній установці.

Підвищити η можливо, використовуючи гнучку систему керування агрегатами холодильною установкою, що враховує її конструктивно-технологічні особливості. Насамперед це термодинамічний цикл досліджуваної холодильної установки. Чим менше процес стиску, тим вище його КПД, а також чим коротше процес охолодження перегрітого газу до стану насичення, тим також вище КПД.

Передатна функція холодильної установки являє собою аперіодичні ланки першого порядку, коефіцієнти передачі і постійного часу (Т).

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

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

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

2.5 Структурна схема системи автоматичного регулювання

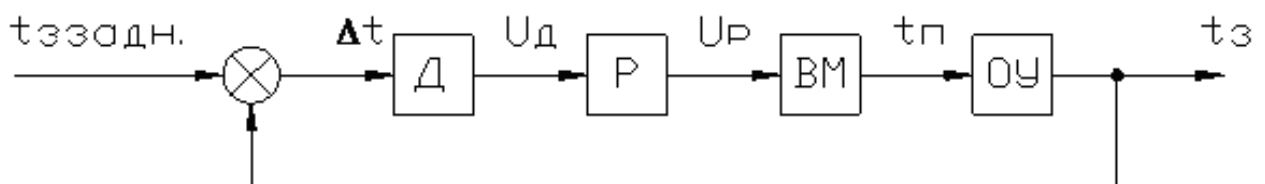


Рисунок 2.6 – Структурна схема САР:

Д – датчик;

Р – регулятор;

ВМ – виконавчий механізм

ОУ – об'єкт управління.

Як видно з рис 2.6 температура зерна в бункері вимірюється датчиком, оскільки об'єм зерна в бункері досить великий, ми використовуємо термopідвіски ТУР-01, сигнал з яких поступає на цифровий регулятор через паралельний порт RS-485, який формує керуюче діяння для виконавчого механізму – холодильній установці котра безпосередньо впливає на об'єкт управління, формуючи необхідну температуру холодильного агента, відбираючого температуру у зерновій маси.

З представленої вище інформації передатні функції мають вигляд:

- датчика

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

- виконавчого механізму

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

- об'єкта управління

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

3 Проектування системи автоматичного регулювання

3.1 Синтез системи охолодження зерна в бункері елеватора

Розглядаючи приведену в підрозділі 2.6 структурну схему системи автоматичного регулювання температури зберігання зерна можна представити її як систему стабілізації, якщо привести структуру системи до вигляду зображеного на рисунку 3.1.

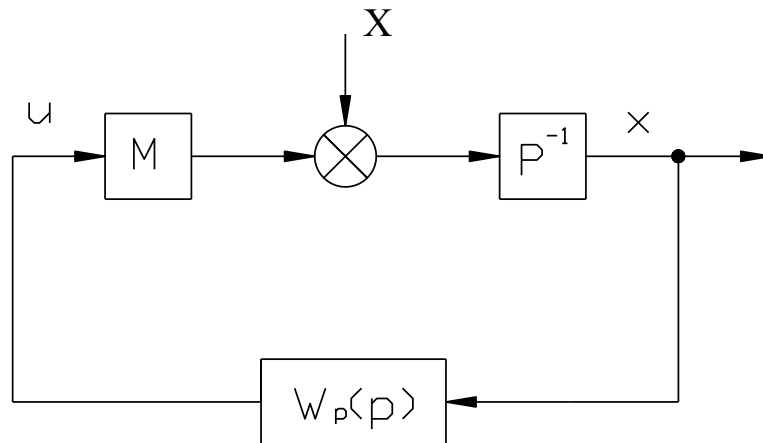


Рисунок 3.1 – Структурна схема системи стабілізації

Тоді рух об'єкту описується лінійним диференціальним рівнянням з постійними коефіцієнтами

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

Тут $x(t)$ – координата об'єкту; $u(t)$ – координата регулятора (управляюче діяння); $\psi(t)$ – зовнішнє збурення, яке передбачається стаціонарним випадковим процесом з нульовим математичним сподіванням та відомою спектральною щільністю

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

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

Необхідно визначити закон управління в колі зворотного зв'язку (знайти диференціальне рівняння, яке зв'язує u та x) так, щоб замкнута система “об'єкт + регулятор” була стійка і оптимальна в досягненні мінімуму квадратичного функціоналу

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

де r та c – вагові константи, $\langle x^2 \rangle, \langle u^2 \rangle$ – дисперсія величин x та u .

Необхідно знайти рівняння регулятора

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

(операторні поліноми $W_0(p)$ та $\tilde{W}(p)$) так, щоб функціонал (2.3.3) досягав мінімуму на класі стійких замкнутих систем “об’єкт + регулятор”.

Рівняння регулятора знаходимо за методикою Ларіна [17]. Синтез системи стабілізації виконуємо з допомогою середовища MatLab. Для зручності користування програмним середовищем замість оператора p будемо використовувати 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

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

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

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

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

$\alpha(s)$ та $\beta(s)$ – обираються довільно;

$\Gamma_0(s)$ та $\Gamma_1(s)$ – поліноми з нулями лише в лівій півплощині.

По-перше необхідно привести структурну схему системи до вигляду рисунку 3.1. Тобто необхідно визначити поліноми $P(s)$ та $M(s)$, а також визначити спектральну щільність $S_M(s)$. Так як на систему діють шуми, які виникають внаслідок: різномірності зернової маси; дії вологості і температури повітря оточуючого середовища бункера; застосування холодильної установки, тому загальний шум який діє в системі і являє собою адитивну суміш перелічених джерел приймемо, як «білий» шум. Якщо підставити знайдені передаточні функції у початкову структурну схему і

виконати необхідні перетворення то вона матиме вигляд зображений на рисунку 3.2.

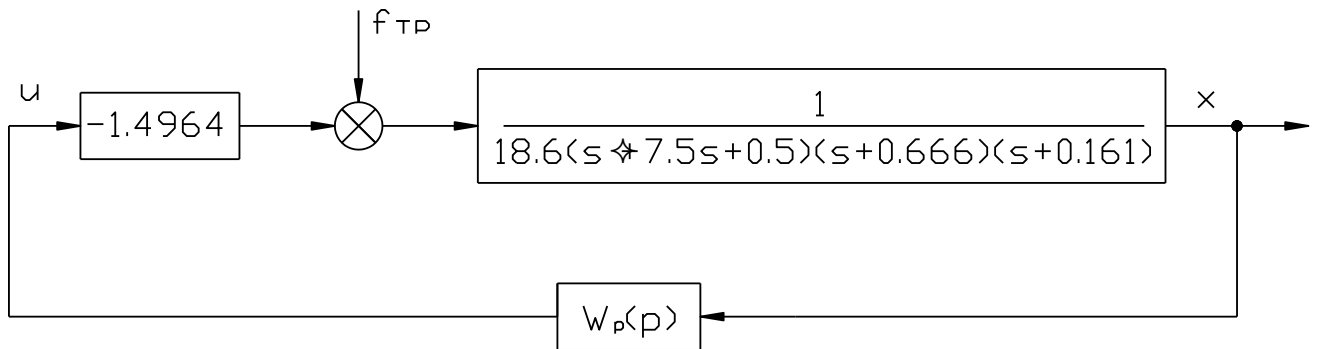


Рисунок 3.2 – Структурна схема системи

Виконавши необхідні перетворення одержимо:

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

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

та виконавши факторизацію $S_{\psi}(s)$ одержимо

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

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

Передаточну функцію $W(s)$ регулятора будемо визначати при вагових коефіцієнтах функціоналу $r = 1$, а $c = -K_c \cdot (s - \omega_c) \cdot (s + \omega_c)$, причому K_c і ω_c можуть приймати значення $K_c = [0.05, 0.1, 0.5, 1, 5, 10, 50]$,

$$\omega_c = [0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1]$$

Визначаємо передаточну функцію $W(s)$ регулятора для першого випадку при $r = 1$ та $c = -0.05 \cdot (s + 0.01) \cdot (s - 0.01)$. Необхідні розрахунки виконуємо в середовищі MatLab. Приймаємо $\alpha = 0$, $\beta = 1$, тоді за формулами (3.5-3.10)

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

Zero/pole/gain:
 $18.6 (s+7.433) (s+0.666) (s+0.161) (s+0.06727)$

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

Zero/pole/gain:
 -1.4964

$GG_-=r*M*M_-+c*P*P_-$

Zero/pole/gain:
 $-17.298(s+7.433)(s-7.433)(s+0.6366)(s+0.4844)(s-0.4844)(s-0.6366)(s^2-0.385s+0.157)*(s^2+0.385s+0.157)$

$G_-=-\sqrt{17.298}*(s-7.433)*(s-0.4844)*(s-0.6366)*(s^2-0.385s+0.157)$

Zero/pole/gain:
 $-4.1591 (s-7.433) (s-0.6366) (s-0.4844) (s^2 - 0.385s + 0.157)$

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

Zero/pole/gain:
 0.1799

 --

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

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

$0.044745 (s-7.433) (s-0.91) (s^2 - 0.6633s + 0.3979)$

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

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

Zero/pole/gain:

$0.40021 (s+7.433) (s+0.666) (s+0.161)$

 $(s+0.8217) (s^2 + 0.617s + 0.2931)$

Отже отримали передаточну функцію регулятора при $r = 1$ та
 $c=-0.05*(s+0.01)*(s-0.01);$

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

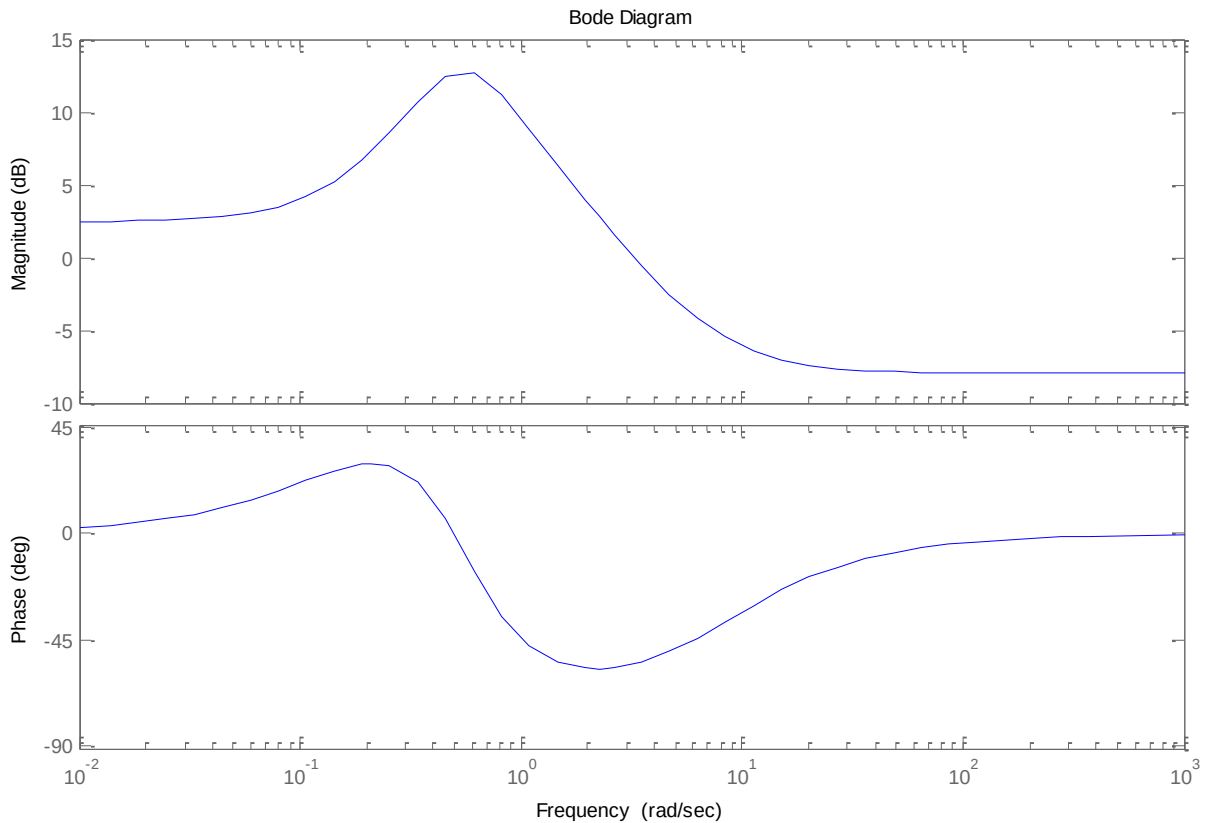


Рисунок 3.2 – ЛАЧХ та ЛФЧХ регулятора (3.15)

Аналогічним чином були виведені передаточні функції для всіх значень K_c і ω_c , результати були зведені в таблицю нижче:

Таблиця 3.1 – Передаточні функції при різних значеннях вагових коефіцієнтів K_c і ω_c

Ваговий коефіцієнт c	Передаточна функція
$-0.1(s+0.01)*(s-0.01)$	$\frac{0.27112(s+7.433)(s+0.666)(s+0.161)}{(s+0.7827)(s^2+0.5729s+0.2356)}$
$-0.1(s+0.02)*(s-0.02)$	$\frac{0.27122(s+7.433)(s+0.666)(s+0.161)}{(s+0.7827)(s^2+0.5732s+0.2357)}$
$-0.1(s+0.05)*(s-0.05)$	$\frac{0.27109(s+7.433)(s+0.666)(s+0.61)}{(s+0.7831)(s^2+0.5749s+0.2359)}$
$-0.1(s+0.1)*(s-0.1)$	$\frac{0.27059(s+7.433)(s+0.666)(s+0.161)}{(s+0.7842)(s^2+0.5811s+0.2366)}$

$-0.1(s+0.2)*(s-0.2)$	$\frac{0.26801(s+7.433)(s+0.666)(s+0.161)}{(s+0.7887)(s^2+0.6047s+0.2391)}$
$-0.1(s+0.5)*(s-0.5)$	$\frac{0.25551(s+7.433)(s+0.666)(s+0.161)}{(s+0.8259)(s^2+0.7324s+0.2495)}$
$-0.1(s+1)*(s-1)$	$\frac{0.30936(s+7.433)(s+0.666)(s+0.161)}{(s+1.112)(s^2+0.8477s+0.2431)}$
$-0.5(s+0.01)*(s-0.01)$	$\frac{0.10757(s+7.433)(s+0.666)(s+0.161)}{(s+0.7192)(s^2+0.4768s+0.1375)}$
$-0.5(s+0.02)*(s-0.02)$	$\frac{0.10753(s+7.433)(s+0.666)(s+0.161)}{(s+0.7192)(s^2+0.4772s+0.1376)}$
$-0.5(s+0.05)*(s-0.05)$	$\frac{0.10735(s+7.433)(s+0.666)(s+0.161)}{(s+0.7194)(s^2+0.4797s+0.1379)}$
$-0.5(s+0.1)*(s-0.1)$	$\frac{0.10679(s+7.433)(s+0.666)(s+0.161)}{(s+0.7202)(s^2+0.4887s+0.139)}$
$-0.5(s+0.2)*(s-0.2)$	$\frac{0.10459(s+7.433)(s+0.666)(s+0.161)}{(s+0.7231)(s^2+0.5222s+0.1431)}$
$-0.5(s+0.5)*(s-0.5)$	$\frac{0.094047(s+7.433)(s-0.666)(s+0.161)}{(s+0.7511)(s^2+0.6917s+0.1615)}$
$-0.5*(s+1)*(s-1)$	$\frac{0.07606(s+7.433)(s+0.666)(s+0.161)}{(s+1.022)(s+0.5965)(s+0.2634)}$
$-1(s+0.01)*(s-0.01)$	$\frac{0.071609(s+7.433)(s+0.666)(s+0.161)}{(s+0.7021)(s^2+0.4379s+0.1075)}$
$-1(s+0.02)*(s-0.02)$	$\frac{0.071377(s+7.433)(s+0.666)(s+0.161)}{(s+0.7021)(s^2+0.4383s+0.1076)}$
$-1(s+0.05)*(s-0.05)$	$\frac{0.071212(s+7.433)(s+0.666)(s+0.161)}{(s+0.7022)(s^2+0.4413s+0.108)}$
$-1(s+0.1)*(s-0.1)$	$\frac{0.070623(s+7.433)(s+0.666)(s+0.161)}{(s+0.7028)(s^2+0.4518s+0.1093)}$
$1(s+0.2)*(s-0.2)$	$\frac{0.068506(s+7.433)(s+0.666)(s+0.161)}{(s+0.7049)(s^2+0.406s+0.1141)}$
$-1(s+0.5)*(s-0.5)$	$\frac{0.059013(s+7.433)(s+0.666)(s+0.161)}{(s+0.7272)(s^2+0.6805s+0.1362)}$
$-1(s+1)*(s-1)$	$\frac{0.044628(s+7.433)(s+0.666)(s+0.161)}{(s+1.013)(s+0.6282)(s+0.2199)}$
$5(s+0.01)*(s-0.01)$	$\frac{0.026658(s+7.433)(s+0.666)(s+0.161)}{(s+0.6793)(s^2+0.3553s+0.05901)}$
$-5(s+0.02)*(s-0.02)$	$\frac{0.026631(s+7.433)(s+0.666)(s+0.161)}{(s+0.6793)(s^2+0.3559s+0.05909)}$

$-5(s+0.05)*(s-0.05)$	$\frac{0.026459(s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.6793)(s^2 + 0.3603s + 0.05964)}$
$-5(s+0.1)*(s-0.1)$	$\frac{0.025878(s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.6794)(s^2 + 0.3754s + 0.06152)}$
$-5(s+0.2)*(s-0.2)$	$\frac{0.023989(s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.68)(s^2 + 0.4284s + 0.06823)}$
$-5(s+0.5)*(s-0.5)$	$\frac{0.017564(s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.6893)(s^2 + 0.4391s + 0.2271)}$
$-5(s+1)*(s-1)$	$\frac{0.011096(s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 1.003)(s + 0.6572)(s + 0.1757)}$
$10(s+0.01)*(s-0.01)$	$\frac{0.017126(s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.6743)(s^2 + 0.3241s + 0.0451)}$
$-10(s+0.02)*(s-0.02)$	$\frac{0.017097(s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.6743)(s^2 + 0.3249s + 0.0452)}$
$-10(s+0.05)*(s-0.05)$	$\frac{0.016926(s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.6743)(s^2 + 0.3301s + 0.04585)}$
$-10(s+0.1)*(s-0.1)$	$\frac{0.01636(s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.6743)(s^2 + 0.3477s + 0.04809)}$
$-10(s+0.2)*(s-0.2)$	$\frac{0.014643(s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.6745)(s^2 + 0.4078s + 0.0559)}$
$-10(s+0.5)*(s-0.5)$	$\frac{0.0097558(s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.6799)(s^2 + 0.468s + 0.1957)}$
$-10(s+1)*(s-1)$	$\frac{0.0057795(s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 1.002)(s + 0.6614)(s + 0.1687)}$
$-50(s+0.01)*(s-0.01)$	$\frac{0.0058095(s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.6687)(s^2 + 0.2643s + 0.02369)}$
$-50(s+0.02)*(s-0.02)$	$\frac{0.0057763(s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.6686)(s^2 + 0.2655s + 0.02385)}$
$-50(s+0.05)*(s-0.05)$	$\frac{0.0056127(s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.6686)(s^2 + 0.2635s + 0.02492)}$
$-50(s+0.1)*(s-0.1)$	$\frac{0.0051383(s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.6685)(s^2 + 0.2991s + 0.02843)}$
$-50(s+0.2)*(s-0.2)$	$\frac{0.0040474(s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.6683)(s^2 + 0.3767s + 0.03954)}$
$-50(s+0.5)*(s-0.5)$	$\frac{0.0021954(s + 7.433)(s + 0.666)(s + 0.161)}{(s + 0.6694)(s + 0.4929)(s + 0.186)}$
$-50(s+1)*(s-1)$	$\frac{0.0011995(s + 7.433)(s + 0.161)}{(s + 1)(s + 0.1626)}$

3.2 Аналіз якості вирішення задачі регулювання

Якість системи автоматичного регулювання оцінюється по значенню квадратичного функціоналу (3.3)

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

де r та c – вагові константи, $\langle x^2 \rangle, \langle u^2 \rangle$ – дисперсія величин x та u .

Необхідно визначити при яких значеннях вагових констант r та c функціонал буде досягати мінімуму.

З формул (3.1– 3.4) знайдемо передаточні функції між координатами системи та зовнішніми впливами:

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

де $W(s) = W_0^{-1}(s)\tilde{W}(s)$. Оскільки замкнута система повинна бути стійкою та, відповідно, функції $F_x(s)$ та $F_u(s)$ повинні бути фізично реалізуємі (не повинні мати полюсів в ПНП), скориставшись перетворенням Фур'є (поклавши $s = i\cdot\omega$), функціонал (3.3) запишемо у вигляді

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Zero/pole/gain:
0.053763 (s+0.8217) (s^2 + 0.617s + 0.2931)
-----
(s+7.433) (s+0.666) (s+0.6366) (s+0.4843) (s+0.161) (s^2 + 0.385s + 0.157)

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

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

>> stdx=norm(Fx*S)

stdx = 0.5

>> stdu=norm(Fu*S)

stdu = 5

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

J= 0.7
```

Функціонал $J = 0.7$, а середньоквадратичне відхилення $\sigma_x = 0.5$, $\sigma_u = 5$.

Аналогічні розрахунки були проведені для інших значень вагового коефіцієнту c .

Значення середньоквадратичного відхилення σ_x для всіх варіацій c зведені в таблицю 3.2, та представлені на рисунку 3.9.

Таблиця 3.2 - σ_x різних значень K_c і ω_c вагового коефіцієнта c

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

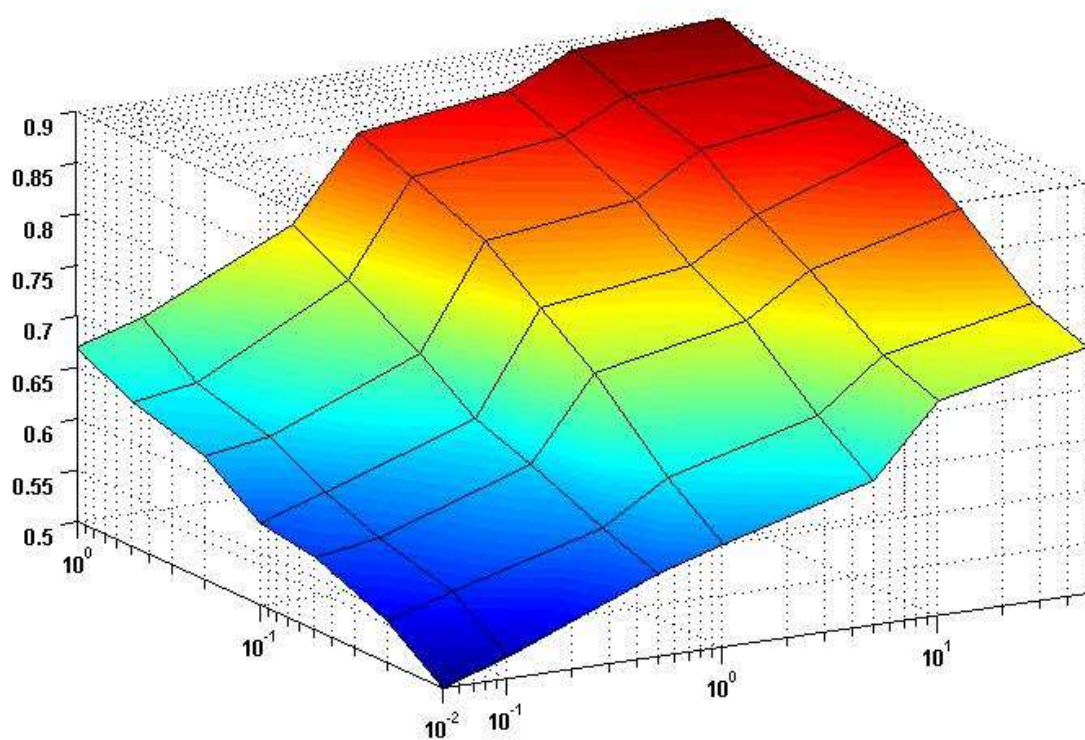


Рисунок 3.9 – Графік залежності σ_x від вагового коефіцієнта c

Значення середньоквадратичного відхилення σ_u для всіх варіацій c зведені в таблицю 3.3, та представлені на рисунку 3.10.

Таблиця 3.3 - σ_u різних значень K_c і ω_c вагового коефіцієнта c

$\omega_c \backslash K_c$	0,05	0,1	0,5	1	5	10	50
0,01	5	4,1	3,7	3,6	3,53	3,44	3,4
0,02	4,2	3,7	3,1	2,7	2,6	2,55	2,5
0,05	3,65	2,87	2,67	2,53	2,4	2,1	1,8
0,1	3,2	2,64	1,81	1,6	1,4	1,2	0,09
0,2	2,98	2,53	1,64	1,5	0,4	0,03	0,01
0,5	2,73	2,45	1,31	1,18	0,27	0,01	0,007
1	2,66	2,3	1,1	0,9	0,02	0,008	0,005

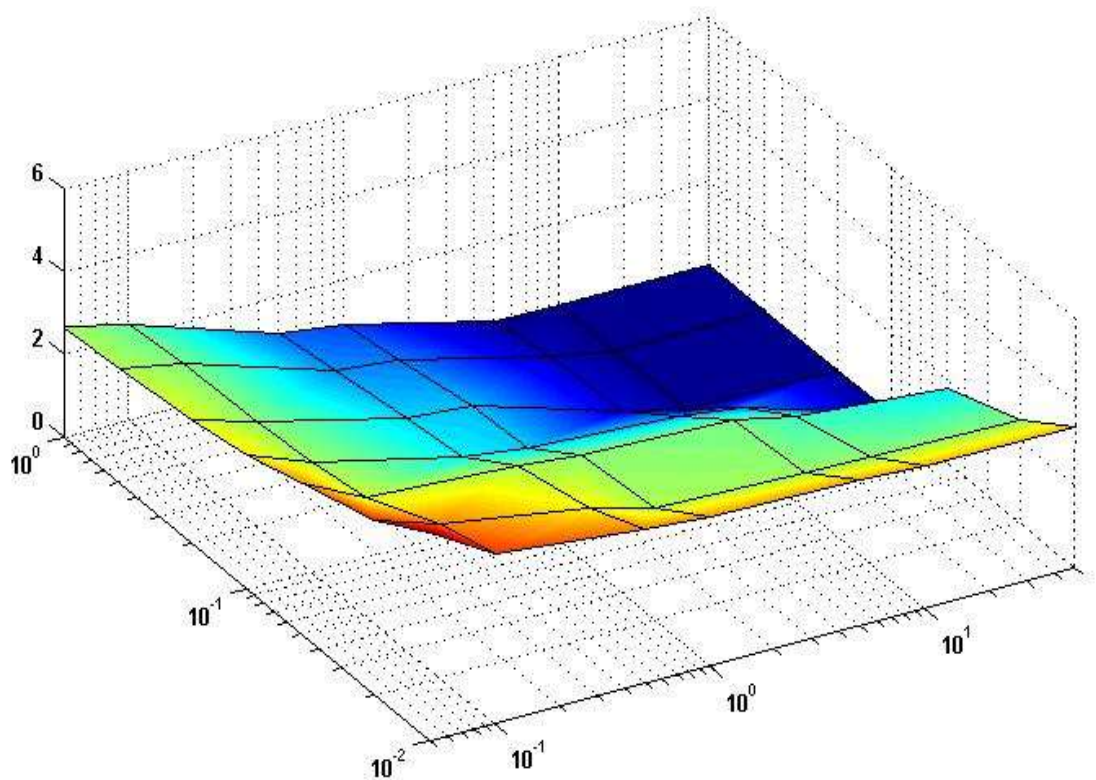


Рисунок 3.10 – Графік залежності σ_u від вагового коефіцієнта c

Значення функціоналу J для всіх варіацій c зведені в таблицю 3.4, та представлені на рисунку 3.11.

Таблиця 3.4 - J різних значень K_c і ω_c вагового коефіцієнта c

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

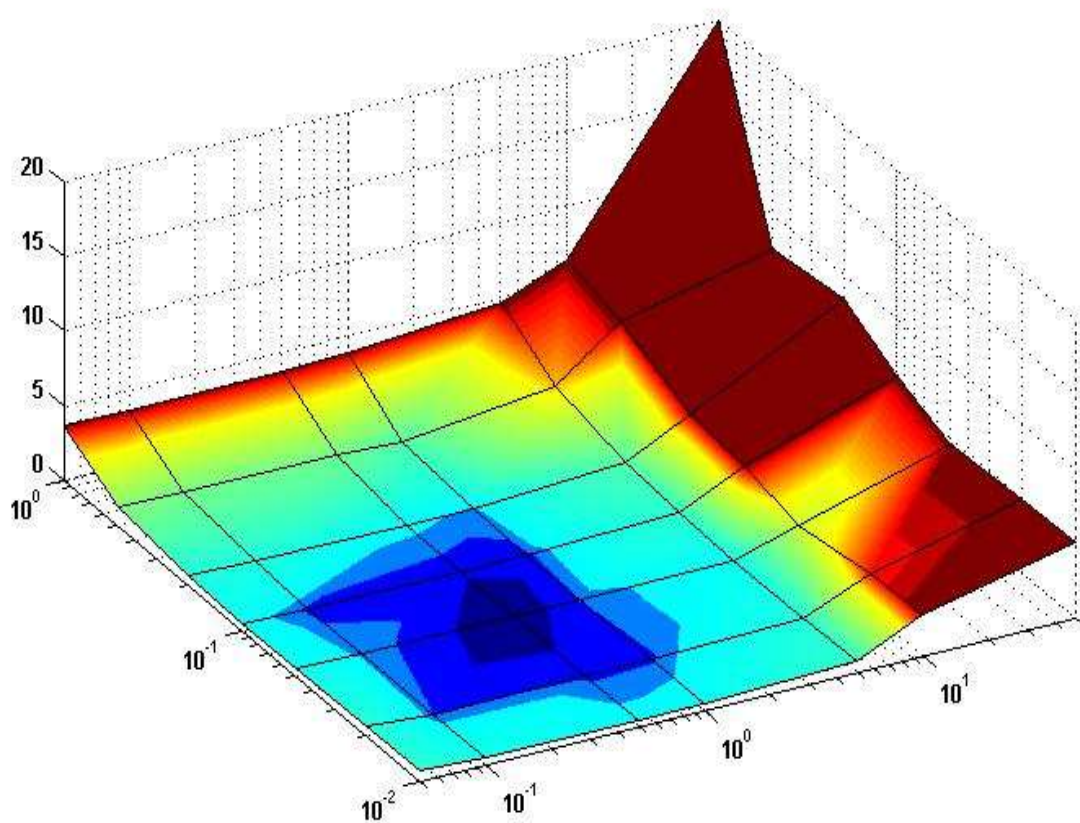


Рисунок 3.11 – Графік залежності функціоналу J від вагового коефіцієнта c

Проаналізувавши дані таблиць 3.2-3.4 та графіки на рис. 3.9-3.11, можна зробити висновок, середньоквадратичне відхилення вихідного сигналу σ_x із зростанням коефіцієнтів K_c і ω_c вагового коефіцієнту c – зростає, а середньоквадратичне відхилення управляючого сигналу σ_u зменшується. При цьому мінімальне значення функціоналу якості J досягається при значеннях $K_c=0,5$ і $\omega_c=0,05$. тому для практичної реалізації був обраний регулятор при цих значеннях:

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

4 Практична реалізація системи автоматичної регулювання

4.1 Визначення періоду дискретизації

Перетворення неперервних сигналів у дискретні пов'язано з наявністю в системі дискретного елемента, на виході якого утворюється послідовність імпульсів. Таким елементом може бути ключ K' , який замикається через кожен період квантування T (рис 4.1).

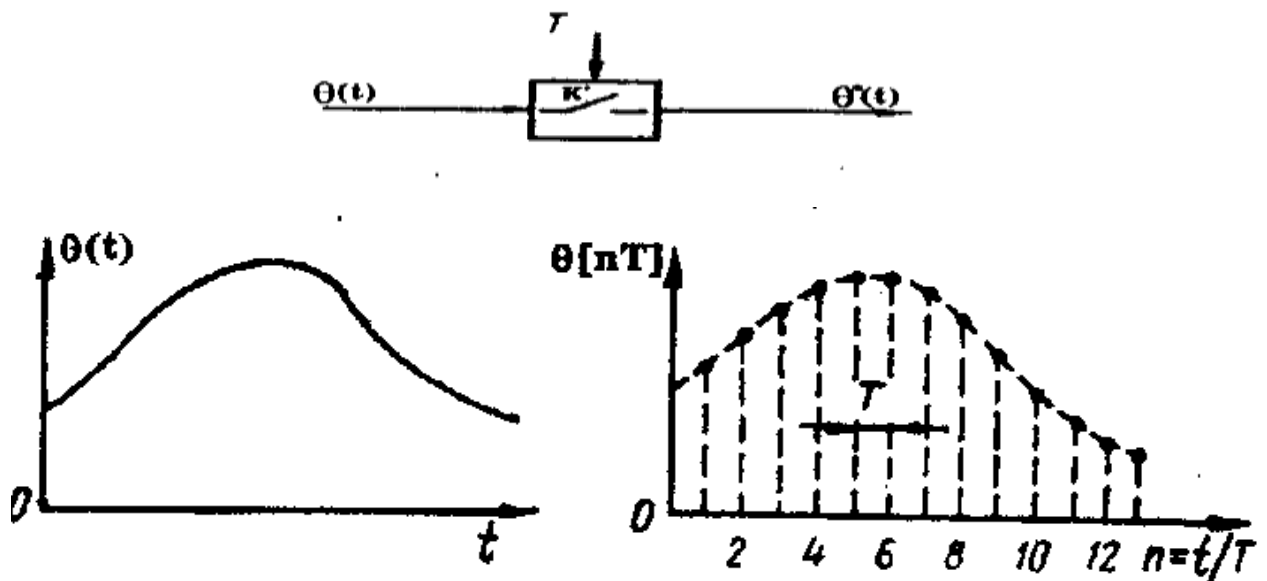


Рисунок 4.1 – Дискретний елемент системи - ключ, та його часові діаграми

Задачу вибору оптимального періоду квантування T можна віднести до однієї з основних проблем оптимальних витрат машинного часу під час реалізації систем цифрового керування. При зменшенні T точність керування й завантаження мікроЕОМ збільшуються, але при цьому неекономно витрачається машинний час. При збільшенні T погіршується якість керування системи. Тому, природно, виникає проблема пошуку компромісного рішення для задоволення цих суперечливих вимог. Залежно від спектра неперервної функції $\Theta(t)$ вибір T здійснюється на підставі теореми Котельникова.

Теорема Котельникова. Функція часу $\Theta(t)$, яка не містить гармонічних складових з частотами, вищими від частоти $\omega_{\max}$ повністю визначається своїми значеннями в моменти часу nT , що відстають один від одного на періоди

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

тобто частота квантування має бути вибрана відповідно до умови $\omega \geq \omega_{\max}$. У цьому випадку дискретна решітчаста функція точно відобразить неперервну функцію

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

і втрати інформації при її квантуванні не буде.

Максимальну частоту $\omega_{\max}$ у спектрі вихідного сигналу $\beta(j\omega)$ за амплітудно-частотною характеристикою замкненого контуру цифрового керування можна визначити за допомогою критерію Джурі. Якщо на вхід регулятора подавати гармонічний одиничний сигнал $\alpha(t) = \sin \omega t$, то вихідний сигнал замкненого контуру можна подати як функцію, тобто

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

Звідси можна визначити частоту $\omega_{\max}$ при якій $|\beta(j\omega)|$ матиме мале значення, тому що замкнена система згладжує високочастотні складові сигналу. Значення Θ_{0m} визначає точність, яку треба забезпечити на виході системи.

Користуючись вихідними даними визначаємо оптимальний період квантування сигналів у цифровій системі.

Частотна передаточна функція об'єкта керування описується рівнянням

$$W_0(p) = \frac{-1,5}{(2 \cdot p^2 + 15 \cdot p + 1)(1,5 \cdot p + 1)(6,21 \cdot p + 1)} \quad (4.4)$$

Частотна передаточна функція регулятора описується рівнянням

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

При цьому потрібна точність керування об'єктом в усталеному режимі $\Theta_{om} = 0.1$

Частотна передаточна функція замкненої системи визначається виразом:

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

В результаті підстановки виразів (4.4, 4.5) в (4.6) одержимо

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

Розв'язуючи це рівняння, знаходимо частоту $\omega_{max} = 1,76$

Оптимальний розрахунковий період квантування сигналів

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

Приймаємо $T < T_{poz}$ $T = 0.1$ с

Ми приймаємо такий період дискретизації тому що для нас важливо забезпечити якомога більшу точність системи.

4.2 Визначення Z-перетворення передаточної функції регулятора

Для реалізації мікропроцесорної системи регулювання необхідно виконати Z-перетворення передаточної функції регулятора одержаної синтезом в розділі 3.1.

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

Виконаємо розбиття передаточної функції регулятора на елементарні дробби:

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

Тепер виконаємо Z-перетворення за допомогою середовища MatLab, при часі дискретизації $T_0 = 0.001$ с.

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

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

За одержаною дискретною передаточною функцією регулятора складаємо різницеві рівняння:

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

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

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

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

Схему програмної реалізації зображено на рисунку 4.2. Де коефіцієнти рівні:

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

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

За одержаною схемою програмної реалізації необхідно побудувати регулятор з використанням мікропроцесора.

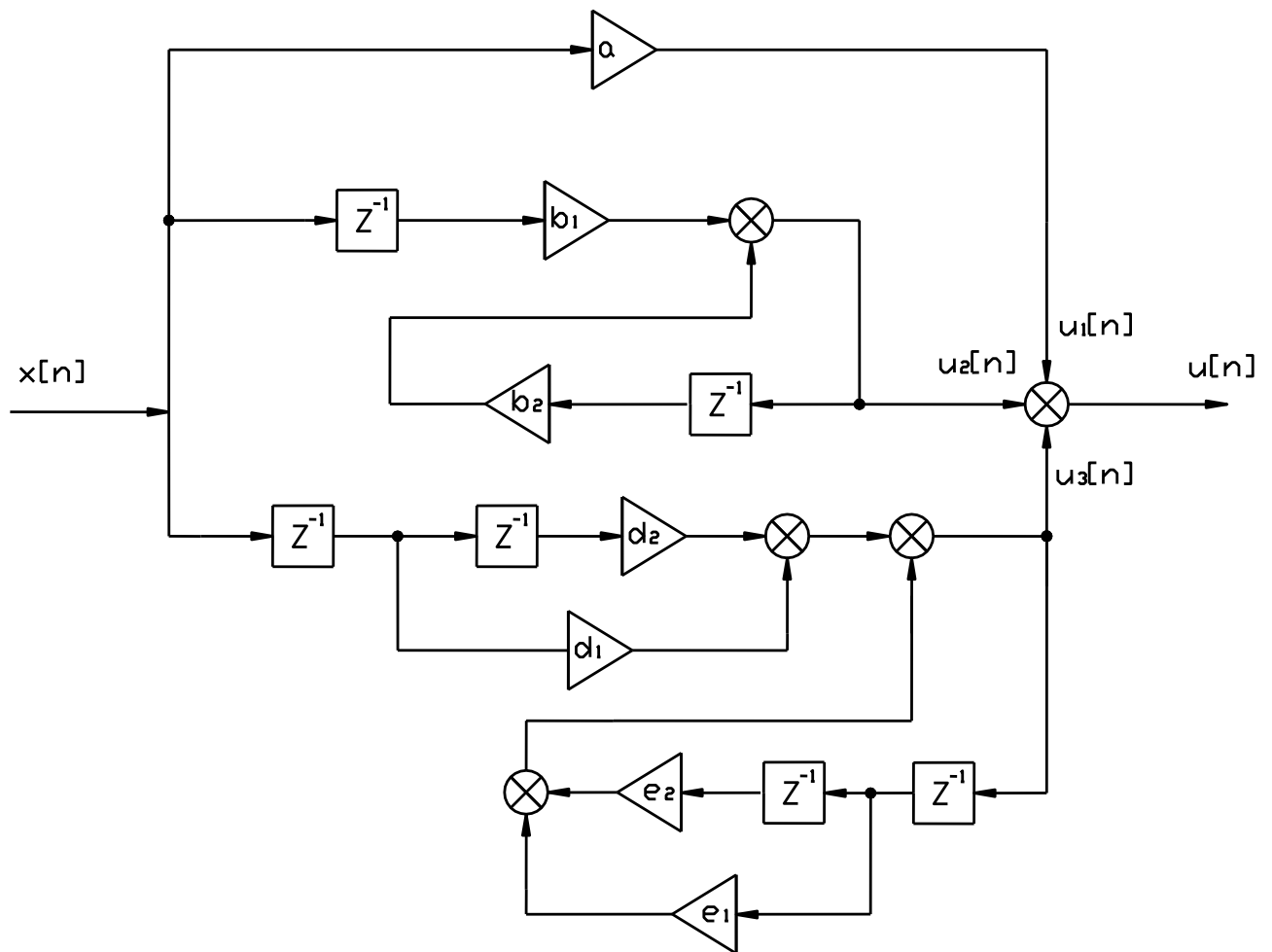


Рисунок 4.2 – Схема програмної реалізації регулятора

Цифровий регулятор будемо на однокристальній мікроЕОМ AVR - AT90S8515.

4.3 Дослідження впливу вологості на температуру зернової маси

З розділу 1.2 відомо, що нормальною вологістю для тривалого зберігання зерна є вологість яка не перевищує 14%, при підвищенні вологості до 18%, температура починає швидко підвищуватись на 7-9°C. Метою даного дослідження є моделювання процесу охолодження зерна при різкому підвищенні вологості до 18%, а саме наскільки швидко вибраний регулятор и виконавчий механізм справляється з пониженням температури при підвищеній вологості.

Для даного дослідження використовуємо середовище Matlab – simulink, в якому складаємо структурну схему дослідження:

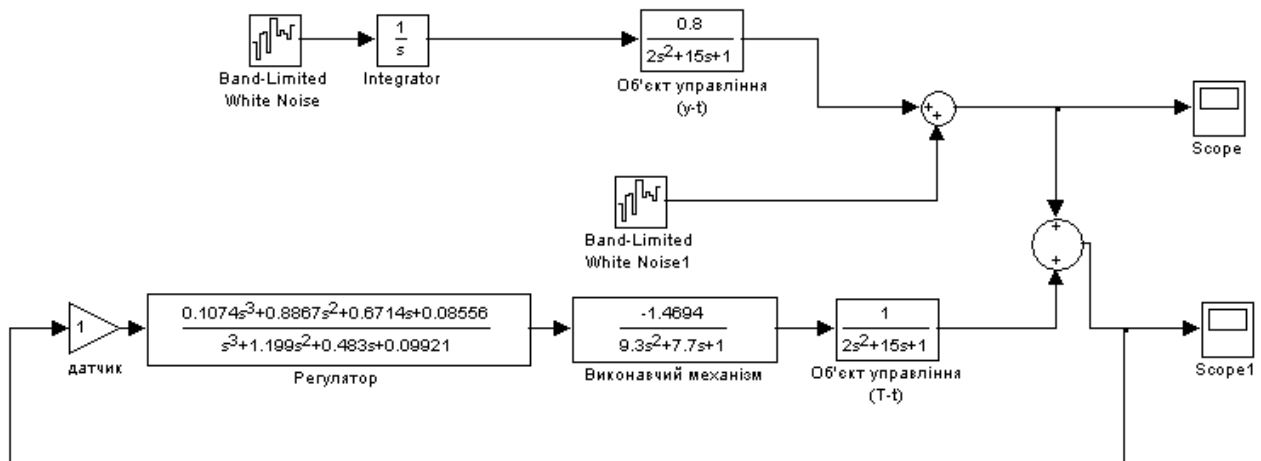


Рисунок 4.7 - Структурна схема дослідження

В дану структурну схему біли включені передатні функції:

- датчика

$$W_d = 1$$

- регулятора

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

- виконавчого механізму

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

- об'єкта управління, залежність температури зернової маси, в залежності від температури повітря поступаємої в силос

$$W_{ov1}(p) = \frac{1}{2p^2 + 15p + 1}$$

- об'єкта управління, залежність температури зернової маси, в залежності від вологості

$$W_{ov2}(p) = \frac{0.08}{2p^2 + 15p + 1}$$

Вологість яка негативно впливає на зернову масу в схемі визначено, як інтегрований білий шум.

При моделюванні отримуємо графіки залежності температури від часу, без регулювання (рис 4.8), з впливом системи автоматичного регулювання (рис 4.9).

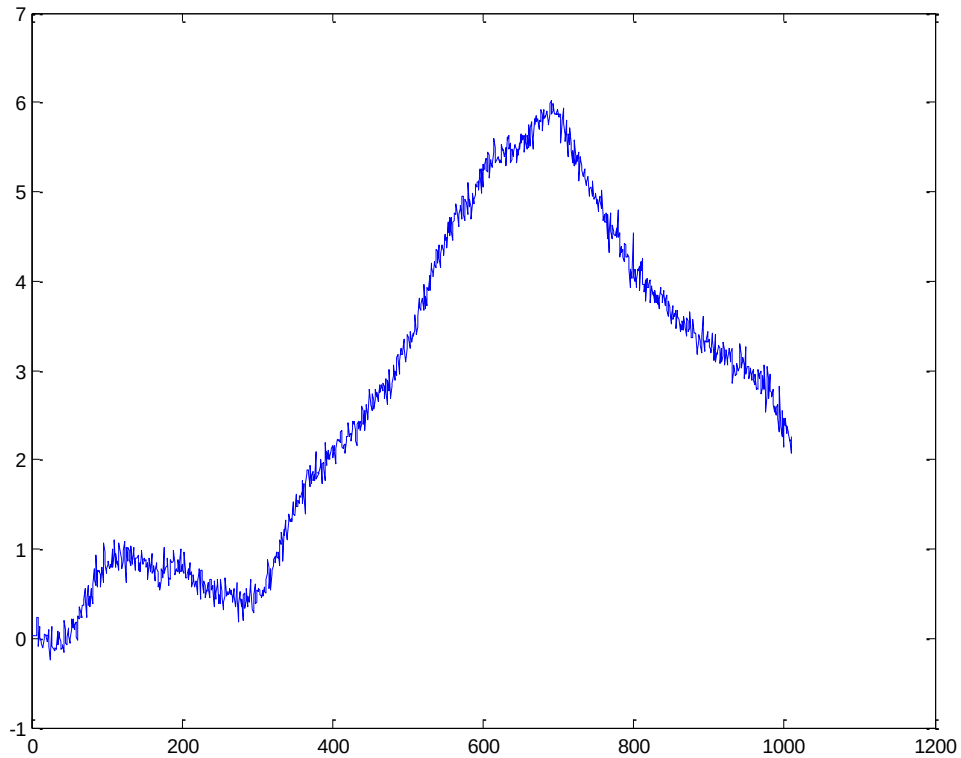


Рисунок 4.8 - Вплив вологості на температуру зернової маси

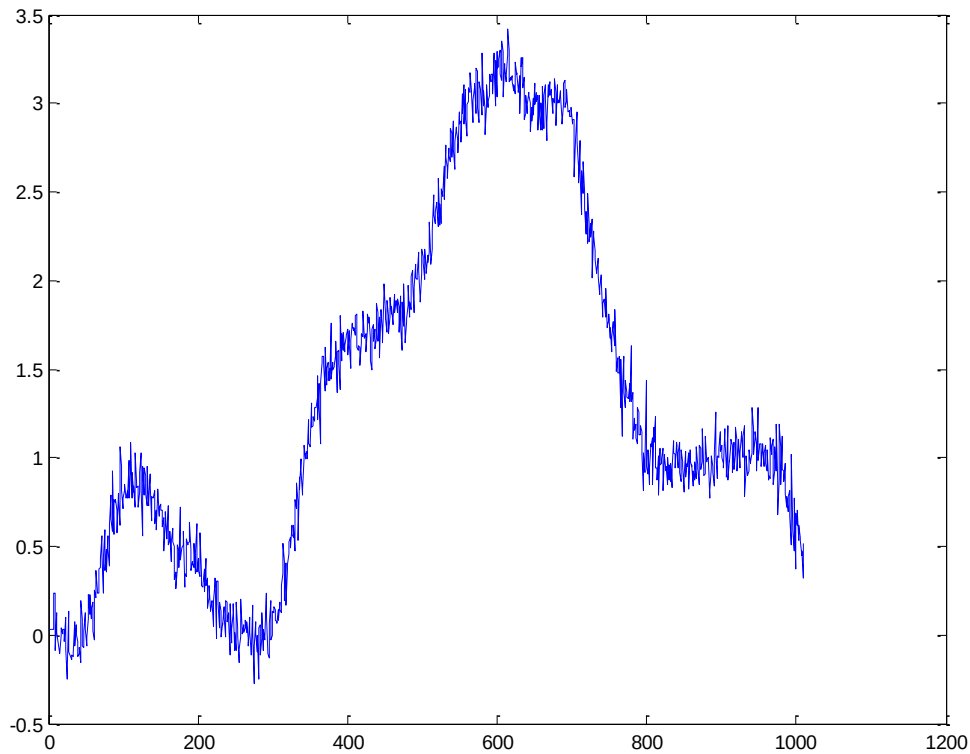


Рисунок 4.9 – Зміна температури при підвищенні вологості з впливом на температуру регулятора

При подальшому дослідженні змінюємо інтенсивність білого шуму, тобто змінюємо інтенсивність впливу вологи на температуру зернової маси, будуємо графіки і перевіряємо, як буде реагувати і справлятися система автоматичного регулювання в даних умовах, і в яких межах дана система зможе утримувати температуру, та як швидко реагуватиме на відносно різку зміну температури.

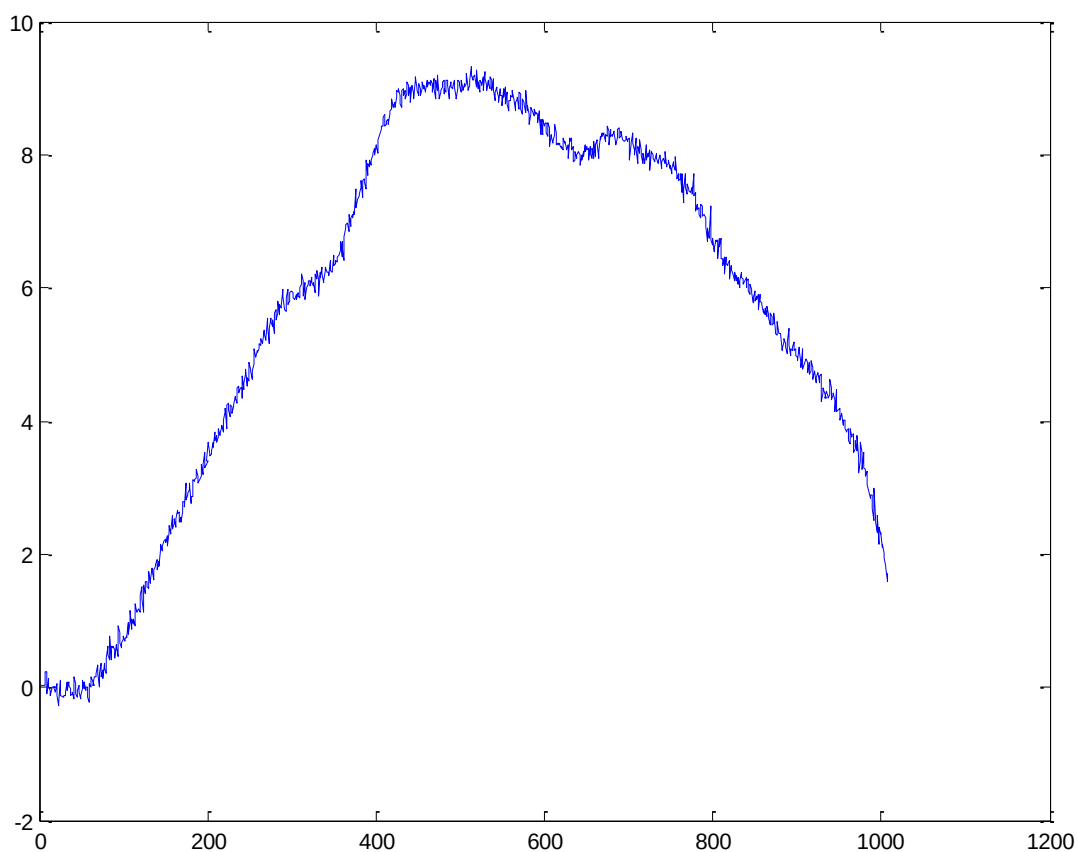


Рисунок 4.10 - Вплив вологості на температуру зернової маси

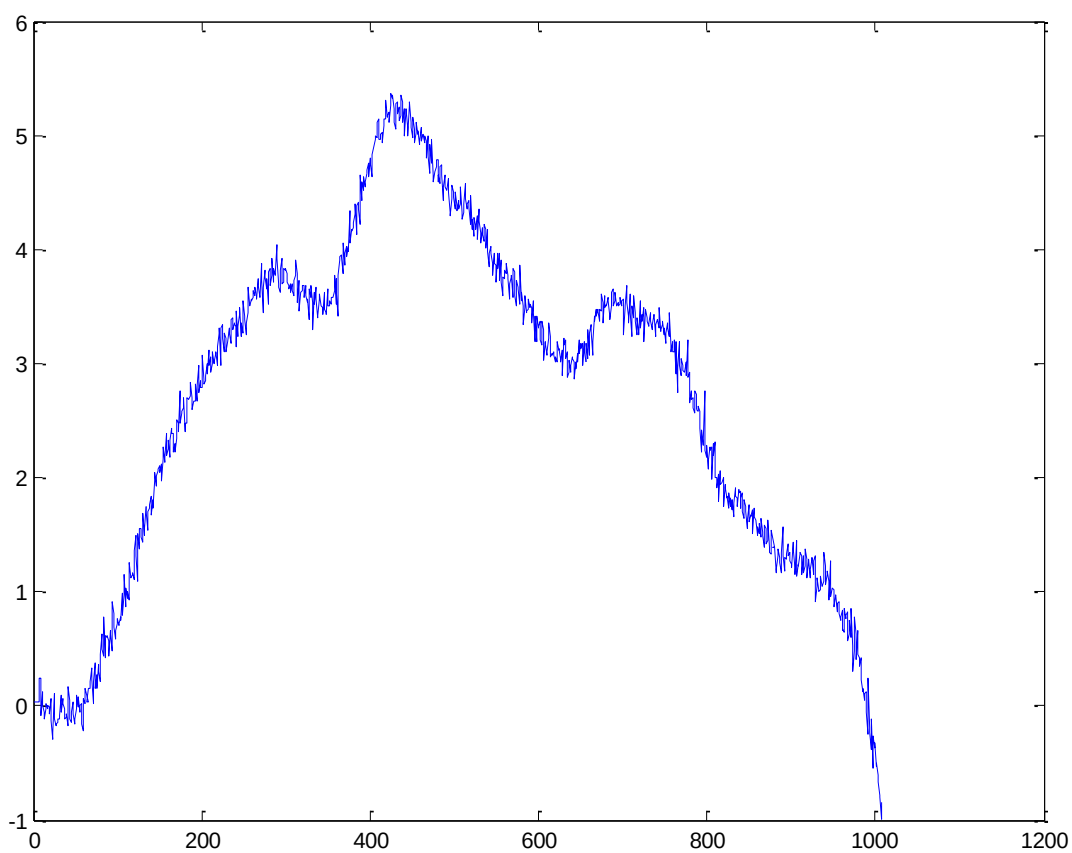


Рисунок 4.11 – Зміна температури при підвищенні вологості з впливом на температуру регулятора

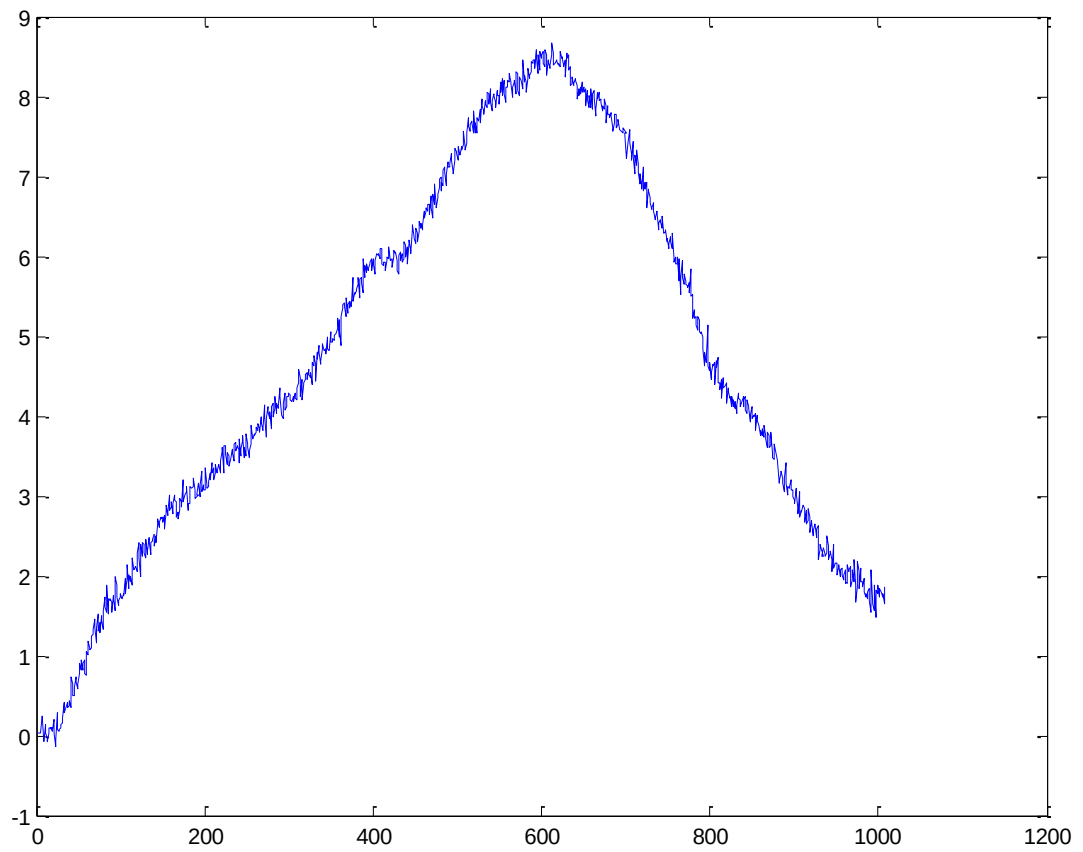


Рисунок 4.12 - Вплив вологості на температуру зернової маси

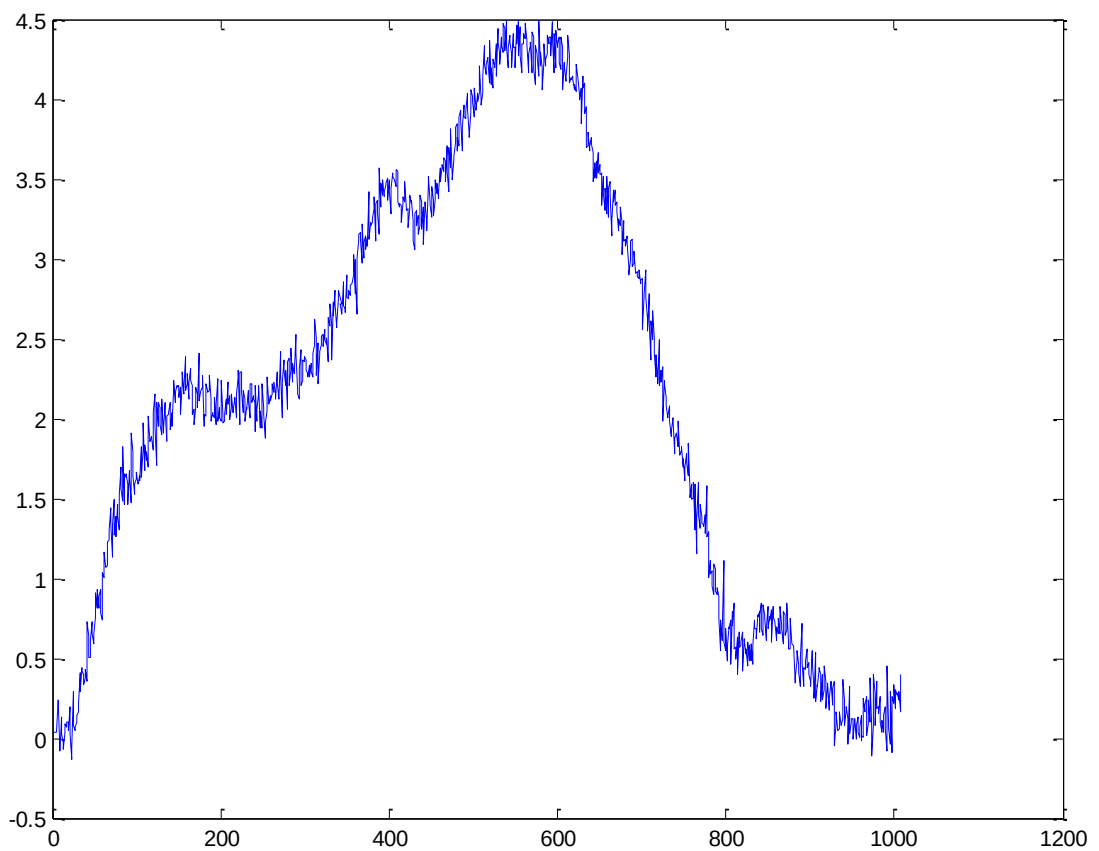


Рисунок 4.13 – Зміна температури при підвищенні вологості з впливом на температуру регулятора

Як видно з представлених залежностей система автоматичного регулювання майже вдвічі зменшує негативний вплив різкого підвищення вологості і продовжує ефективно охолоджувати зерно в силосі елеватора.

Тобто синтезований регулятор, який був обраний серед інших з найкращими показниками якості $\sigma_x=0,63$, $\sigma_x=2,67$, $J=0,27$, добре справляється з задачею регулювання температури на силосі елеватора навіть при підвищенні вологості, що добре відбиватиметься на показниках якості і строках зберігання зерна. Але при значному підвищенні вологості зерна його рекомендовано просушити до заданого значення вологості, для ефективного подальшого зберігання.

Реалізація системи автоматичного регулювання виконана на мікроконтролері AT90S8515 дає просте і ефективне використання даної системи, а також застосування гнучкої програми, що дозволяє її використання в різних кліматичних умовах.

Висновки

1. Розглянуто технологія зберігання зерна, а також його фізичні особливості, не тільки з точки зору живого організму, а й з точки зору об'єкта регулювання.

2. Розроблена структурна схема системи автоматичного регулювання температури зернової маси в силосі елеватора, шляхом активного вентиляювання охолодженим повітрям, для якої були обрані термopідвіска, вентилятор і холодильна установка.

3. Проведений синтез передаточних функцій для різних вагових коефіцієнтів, для забезпечення найбільш оптимального вирішення задачі по регулюванню температури в силосі елеватора.

4. При проведені аналізу якості був вибраний регулятор з найкращим показником якості функціоналу $J=0,27$, та середньоквадратичними відхиленнями $\sigma_x = 0.63$ та $\sigma_u = 2,67$.

5. Розроблений алгоритм програмної реалізації для оптимального регулятора, та схемна реалізація даного алгоритму на мікроконтролері AT90S8515, побудована електрична принципова схема.

6. В результаті дослідження було визначено вплив вологості на якість регулювання, спроектованої системи. За результатами дослідження був зроблений висновок що дана система регулювання справляється з поставленою задачею, по регулюванню температури навіть при підвищеній вологості.

Список літератури

1. І.І. Мартиненко та ін. Автоматика в сільськогосподарському виробництві. К. Урожай 1989, - 168 с.
2. В.Л. Пепелюк. Технология хранения зерна и семян. – Москва: 2008 год. – 357 с.
3. Казаков Е.Д., Карпиленко Г.П. Биохимия зерна и хлебопродуктов. М. Москва – 2005- 512 с.
4. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування: Підручник. – 2-ге вид., – К.: Либідь, 2007. - 656 с.
5. Åström K.J., Hägglund T. Advanced PID control. – ISA (The Instrumentation, System, and Automation Society) , 2006. — 460 p.
6. Astrom K.J. Advanced PID Control [Текст] / Astrom K.J., Hagglund T. - Instrumentation, Systems, and Automation Society, USA, 2006. – 250 p.
7. Astrom K.J. Control System Design. Lecture notes for ME 155A [Текст] / Astrom K.J. - Department of Automatic Control Lund Institute of Technology, Sweden, 2002. – 168 p.
8. Гостев В. Й., Стеклов В.К. Системы автоматического управления с цифровыми регуляторами: Справочник. – К.: "Радіоаматор", 1998.
9. 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.
10. Теорія автоматичного управління: Навчальний посібник [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології кібер-енергетичних систем»; уклад.: О. Й. Штіфзон, П. В. Новіков, В.П. Бунь. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,2 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 144 с.

11. Аналіз та синтез систем автоматичного керування в MATLAB. Навчальний посібник/ О.Г. Гурко, І.Ф.Єрьоменко. – Харків: ХНАДУ, 2011. - 286 с.
12. Matlab Documentation.[Електронний ресурс]. - Режим доступу: - <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/control>.
13. Simulink Documentation [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/simulink>.
14. Теорія систем керування: підручник / В.І. Корнієнко, О.Ю. Гусєв, О.В. Герасіна, В.П. Щокін; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Дніпро: НГУ, 2017. – 497 с.
15. А.П. Ладанюк Теорія автоматичного керування технологічних об'єктів: Навч. посіб. / А.П. Ладанюк, К.С. Архангельська, Л.О. Власенко – К.: НУХТ, 2014. – 274 с.
16. Автоматизація виробничих процесів: навч. посіб. / Б. М. Гончаренко, С. І. Осадчий, Л. Г. Віхрова [та ін.]. - Кіровоград: Лисенко В.Ф., 2016. - 352 с.
17. Ларин В.Б., Сунцев В.Н. О задаче аналитического конструирования регуляторов. - Автоматика и телемеханика, №12, 1968.