

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Приладобудівний факультет

Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

До захисту допущено:

В.о. завідувача кафедри

_____ Галина БОГДАН

«__» _____ 20__ р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи
та технології в приладобудуванні»**

**спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології»**

на тему: «Автоматизована система вагового дозування зерна»

Виконав:

студент IV курсу, групи ПМ-11

Руденко Ярослав Віталійович _____

Керівник:

ст. вик. Зайцев Віктор Миколайович _____

Рецензент:

к.т.н. доцент каф. КІТВП

Терещенко Микола Федорович _____

Засвідчую, що у цьому дипломному
проєкті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2025 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ	Пояснювальна записка	85	
3	A1	ДПБ ПМ11.08.001 Е1	Структурна схема автоматизованої системи вагового дозування зерна	1	
4	A1	ДПБ ПМ11.08.002 Е2	Функціональна схема автоматизованої системи вагового дозування зерна	1	
5	A1	ДПБ ПМ11.08.003	Блок-схема алгоритму автоматизованої системи вагового дозування зерна	1	
6	A1	ДПБ ПМ11.08.004	Результати моделювання роботи автоматизованої системи вагового дозування зерна	1	
7	A4	ДПБ ПМ11.08.005	Внутрішнє вставне кільце	1	
8	A4	ДПБ ПМ11.08.006	Зовнішнє вставне кільце	1	
9	A3	ДПБ ПМ11.08.007	Зовнішній кожух	1	
10	A4	ДПБ ПМ11.08.008	Кришка клемної коробки	1	
11	A3	ДПБ ПМ11.08.009	Монтажна плита	1	
12	A3	ДПБ ПМ11.08.010	Прокладка діафрагми	1	
13	A2	ДПБ ПМ11.08.011	Тензогенеруючий вузол	1	
14	A2	ДПБ ПМ11.08.012	Складальне креслення	1	

				<i>ДПБ ПМ11.08.000</i>		
	ПБ	Підп.	Дата			
Розробн.	Руденко Я. В.			Відомість дипломного проєкту	Лист	Листів
Керівн.	Зайцев В. М.				1	1
Консульт.					КПІ ім. Ігоря Сікорського Гр. ПМ-11	
Н/контр.						
В.о. зав.каф.	Богдан Г. А.					

Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Автоматизована система вагового дозування
зерна»

Київ – 2025 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Приладобудівний факультет
Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

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

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

_____ Галина БОГДАН

«__» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
на дипломний проєкт студенту
Руденку Ярославу Віталійовичу

1. Тема проєкту «Автоматизована система вагового дозування зерна», керівник проєкту ст. вик. Зайцев Віктор Миколайович, затверджені наказом по університету від « 26 » _____ травня _____ 2025р. № _____ 1765-с _____

2. Термін подання студентом проєкту: « 13 » _____ червня _____ 2025р _____

3. Вихідні дані до проєкту: 3.1.Кількість бункерів ваговимірювальної системи – три; 3.2.Тип ваговимірювальних перетворювачів – тензорезисторний; 3.3.Тип пружного елемента – зсувний; 3.4. Границя допустимої відносної похибки сумарної маси зерна - 0,2%; 3.5. Категорія точності ваговимірювального датчика С1 (ДСТУ EN45501); 3.6. Максимальна продуктивність системи 2500 кН/год; 3.7. Найбільша границя зважування одного перетворювача 5 т. _____

4. Зміст пояснювальної записки: Вступ; Розділ 1 – Засоби автоматизації роль автоматизації у сфері аграрної промисловості; Розділ 2 – Автоматизована система вагового дозування. Процес дозування. Структура системи та принцип роботи; Розділ 3 – Програмне забезпечення автоматизованої системи.

Особливість роботи алгоритму АСВДЗ; Розділ 4 – Тензометрія та робота тензометричного датчика. Моделювання роботи автоматизованої системи вагового дозування зерна.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): Структурна схема автоматизованої системи вагового дозування зерна - ф.А1; Функціональна схема автоматизованої системи вагового дозування зерна - ф.А1; Блок-схема алгоритму автоматизованої системи вагового дозування зерна - ф.А1; Результати моделювання роботи автоматизованої системи вагового дозування зерна - ф.А1. Внутрішнє вставне кільце - ф.А4; Зовнішнє вставне кільце - ф.А4; Зовнішній кожух - ф.А3; Кришка клемної коробки - ф.А4; Монтажна плита - ф.А4; Прокладка діафрагми - ф.А3; Тензогенеруючий вузол - ф.А2; Складальне креслення датчика – ф.А2.

6. Дата видачі завдання 26 «березня» 2025р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Отримання завдання на виконання	26.03.25	
2	Розгляд засобів автоматизації. Автоматизації в аграрній промисловості	08.03.25	
3	Опис автоматизованої системи вагового дозування зерна та процесу дозування	14.03.25	
4	Розробка структурної схеми системи	19.03.25	
5	Розгляд питання розробки програмного забезпечення для автоматизованих систем	29.03.25	
6	Розробка блок-схеми алгоритму роботи ПЗ	10.04.25	
7	Розгляд питання задачі тензометрії. Принцип роботи тензометричного датчика	18.04.25	
8	Виконання моделювання роботи системи вагового дозування зерна	10.05.25	
9	Проведення аналізу результатів виконання моделювання. Побудова графіків роботи системи	20.05.25	

Студент

Ярослав РУДЕНКО

Керівник

Віктор ЗАЙЦЕВ

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка дипломного проєкту складається зі списку умовних позначень, вступу, чотирьох розділів основної частини, загальних висновків та списку використаних джерел. Містить 76 сторінок основного тексту, 35 рисунків, 2 таблицю та 22 літературних джерел.

Метою дипломного проєкту є проведення аналізу сучасних технологічних рішень та систем автоматизації, які застосовуються у сфері аграрної промисловості, з подальшим визначенням впливу на ефективність виробництва та якість продукції, зокрема у контексті виконання задачі вагового дозування зерна. У подальшому буде сформована структура системи та її приклад реалізації.

Завдання до дипломного проєкту включають:

- виконання аналізу технічних засобів автоматизації виробничих процесів у аграрній промисловості;
- виконання опису принципу роботи та функцій автоматизованої системи вагового дозування зерна;
- визначення способів вагового дозування та розробка структурної схеми системи;
- на основі структурної схеми та способу дозування виконати розробку принципової схеми системи;
- розробити та описати алгоритм роботи програмного забезпечення автоматизованої системи дозування зерна;
- виконати моделювання роботи автоматизованої системи вагового дозування зерна з подальшим аналізом отриманих результатів.

Ключові слова: автоматизація, автоматизована система, система дозування, точність дозування, моделювання автоматизованих систем

ABSTRACT

The explanatory note of the diploma project consists of a list of symbols and abbreviations, an introduction, four main chapters, general conclusions, and a list of references. Contains 76 pages of main text, 35 illustrations, 2 table, and 22 literary sources.

The aim of the diploma project is to analyze modern technological solutions and automation systems used in the agricultural industry, followed by the assessment of their impact on production efficiency and product quality, particularly in the context of solving the problem of grain weight dosing. Subsequently, the system structure and an example of its implementation will be developed.

The objectives of the diploma project include:

- conducting an analysis of technical automation tools used in agricultural production processes;
- describing the operating principle and functions of the automated grain weight dosing system;
- identifying the methods of weight dosing and developing a structural diagram of the system;
- based on the structural diagram and dosing method, designing the system's schematic diagram;
- developing and describing the software algorithm of the automated grain dosing system;
- modeling the operation of the automated grain weight dosing system and analyzing the obtained results.

Keywords: automation, automated system, dosing system, dosing accuracy, modeling of automated systems

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ.....	10
ВСТУП.....	11
1 ЗАСОБИ АВТОМАТИЗАЦІЇ. РОЛЬ АВТОМАТИЗАЦІЇ У СФЕРІ АГРАРНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ.....	12
1.1. Засоби та технології автоматизації технологічних процесів. Структура системи автоматизації.....	12
1.2. Автоматизація та цифрові технології в аграрному секторі промисловості.....	15
1.3. Визначення мети та актуальності обраної теми. Формування переліку завдань.....	20
1.4. Висновки до розділу 1.....	21
2 АВТОМАТИЗОВА СИСТЕМА ВАГОВОГО ДОЗУВАННЯ. ПРОЦЕС ДОЗУВАННЯ. СТРУКТУРА СИСТЕМИ ТА ПРИНЦИП РОБОТИ ОГЛЯД ВИМІРЮВАЛЬНИХ ДАТЧИКІВ.....	22
2.1. Процес дозування та способи виконання дозування. Загальні аспекти системи автоматизованого вагового дозування.....	22
2.2. Розробка та опис структурної схеми системи. Центральна обчислювальна система.....	26
2.2.1. Розробка загальної структури системи АСВДЗ.....	26
2.2.2. Будова мікропроцесорної центральної обчислювальної системи.....	28
2.3. Розробка та опис функціональної схеми системи.....	31
2.4. Огляд високоточних вимірювальних датчиків та їх характеристик.....	33
2.5. Висновки до розділу 2.....	40

					ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.		Руденко Я.В.			Автоматизована система вагового дозування зерна. Пояснювальна записка.	Літера	Аркуш	Аркушів	
Перевірів		Зайцев В.М.					8	85	
						ПБФ, «КПІ ім. І. Сікорського»			
Н. контр.									
Затв.									

3 ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ. ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ АЛГОРИТМУ АСВДЗ.....	41
3.1. Особливості системного програмування систем автоматизації...	41
3.2. Розробка алгоритму роботи АСВДЗ.....	44
3.3. Висновки до розділу 3.....	50
4 ТЕНЗОМЕТРІЯ ТА РОБОТА ТЕНЗОМЕТРИЧНОГО ДАТЧИКА. МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ВАГОВОГО ДОЗУВАННЯ ЗЕРНА.....	51
4.1. Тензометрія. Тензодатчик та принцип його роботи. Точність тензодатчика.....	51
4.2. Сутність процесу моделювання роботи автоматизованої системи.....	66
4.3. Розробка та опис програмної моделі АСВДЗ.....	68
4.4. Аналіз та оцінювання результатів моделювання. Візуалізація отриманих результатів.....	75
4.5. Висновки до розділу 4.....	81
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	82
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ ТА ДЖЕРЕЛ.....	83
ДОДАТКИ	

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

АС – автоматизована системи;

АСК – автоматизована система керування;

ЖЦ – життєвий цикл;

ТС – технічна система;

НДР – науково-дослідна робота;

ОК – об'єкт керування;

СК – система керування;

ПК – пристрій керування;

ВП – вимірювальний пристрій;

ВМ – виконавчий механізм;

АСВДЗ – автоматизована система вагового дозування зерна;

ЗЗ – зворотній зв'язок;

ОС – обчислювальна система;

ПЗ – програмне забезпечення;

СПЗ – системне програмне забезпечення;

ТП – тензорезистивний перетворювач;

ЧЕ – чутливий елемент.

					<i>ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ</i>	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

У сучасному агропромисловому виробництві ключовими аспектами є забезпечення точності та ефективності технологічних процесів, зокрема під час обробки, фасування та зберігання зернових культур.

Відповідно, одним із найважливіших етапів є дозування зерна, що є процесом, який потребує дотримання оптимального рівня точності для мінімізації втрат, дотримання визначених рецептур та проведення моніторингу використання.

Звичайні методи дозування, які засновані на ручному керуванні характеризуються низькою точністю, продуктивністю та значною мірою залежать від людського впливу, що у свою чергу не завжди забезпечує точність у заданому діапазоні. Як наслідок значного поширення стали набувати автоматизовані системи контролю, зокрема і в задачах вагового дозування, що як наслідок дозволяє точніше контролювати масу продукції у режимі реального часу, але не менш важливим є те, що така система знизить витрати ресурсів і забезпечить необхідний рівень якості вихідної продукції.

Автоматизована система вагового дозування повинна об'єднувати у своїй будові сучасні технології, зокрема обчислювальні системи на базі контролерів та мікроконтролерів, системи керування та вимірювання та електромеханічні виконавчі механізми. Поєднання усіх цих складових дозволяє реалізувати надійний та ефективний робочий процес з мінімальним втручання оператора.

Такі автоматизовані системи стали важливою складовою автоматизації етапів дозування в аграрній промисловості і поширені, як у великих, так і у малих господарствах.

					<i>ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ</i>	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. ЗАСОБИ АВТОМАТИЗАЦІЇ. РОЛЬ АВТОМАТИЗАЦІЇ У СФЕРІ АГРАРНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

1.1. Засоби та технології автоматизації технологічних процесів. Структура системи автоматизації

Автоматизація є сукупністю технічних, програмних та організаційних засобів, які у поєднанні спрямовані на реалізацію часткового або повного управління процесами без прямої участі людини у цих процесах.

Автоматизовані системи (АС) зазвичай передбачають наявність у своїй структурі систем збору та обробки інформації, а також виконання завдань чи команд у режимі реального часу. Для забезпечення цих задач у ній використовуються спеціальні вимірювальні пристрої та системи, контролери або мікроконтролери, виконавчі механізми.

Загалом, автоматизована система керування (АСК) за складом апаратних і програмних засобів, а також функціям, які здатна реалізувати, відповідає автоматичній системі, яка розширена на апаратному та програмному рівнях у напрямку використання органів керування і відображення інформації. Людська участь у таких системах має безпосереднє відношення до процесу керування, а не тільки стосовно обслуговування системи і контролю її функціонування [1].

Також важливо розуміти різницю між автоматичним та автоматизованим керуванням.

Автоматичне керування являє собою процес, що відбувається без прямого втручання людини-оператора в процеси що реалізують керування. Автоматична система керування є комплексом апаратного та програмного забезпечення (ПЗ), що здійснюють збір інформації, цикли передачі даних, подальшу обробку та формування на основі заданого алгоритму функціонування, які приводять у дію системи виконавчих механізмів. Виконання дій з боку оператора у таких

					<i>ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ</i>	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

системах необхідна лише для забезпечення обслуговування системи і контролю її функціонування [1].

Автоматизоване керування у свою чергу являє процес, у якому людина-оператор бере участь як частина системи управління та контролю. До переліку задач які виконує оператор системи зазвичай є загальний процес керування, а також вибір режимів і параметрів її роботи, а також керування процесами, що не піддаються чи не підлягають автоматизації. Але, всі функції які пов'язані з вимірюваннями, розрахунками та безлічі інших, то система відпрацьовує в автоматичному режимі [1].

Метою автоматизації є певна визначена ціль для досягнення якої використовується автоматизована системи, наприклад дотримання певного показника у зазначеному допустимому діапазоні, виконання циклічних операції у певному процесі, або навіть обробка матеріалу тощо.

У життєвому циклі (ЖЦ) будь-якої технічної системи (ТС) можна виділити такі стадії [2]:

- 1) проектування, що включає проектно-конструкторські та науково-дослідні роботи (НДР);
- 2) впровадження, яка складається з монтажу та наладки;
- 3) експлуатація;

Тенденції розвитку ТС пов'язані насамперед з масштабування та зростанням складності їх структури при скороченні тривалості ЖЦ [2].

У загальному випадку систему керування, що реалізує функції логічного керування деяким технологічним об'єктом можна визначити структурою, що складається з [1]:

- об'єкта керування (ОК)
- системи керування (СК).

Відповідно система керування складається з таких компонентів як пристрій керування (ПК), вимірювальних пристроїв (ВП) та виконавчих механізмів (див. рис. 1.1).

					<i>ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ</i>	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Технологічні параметри ОК зчитуються датчиками, та переформовуються в електричну форму, зазвичай з аналогового в цифровий сигнал, які містять у собі корисну інформацію для подальшої передачі на вхід ПК. Ці сигнали зазвичай називають вхідними сигналами, інформаційними сигналами або вхідною інформацією [1].

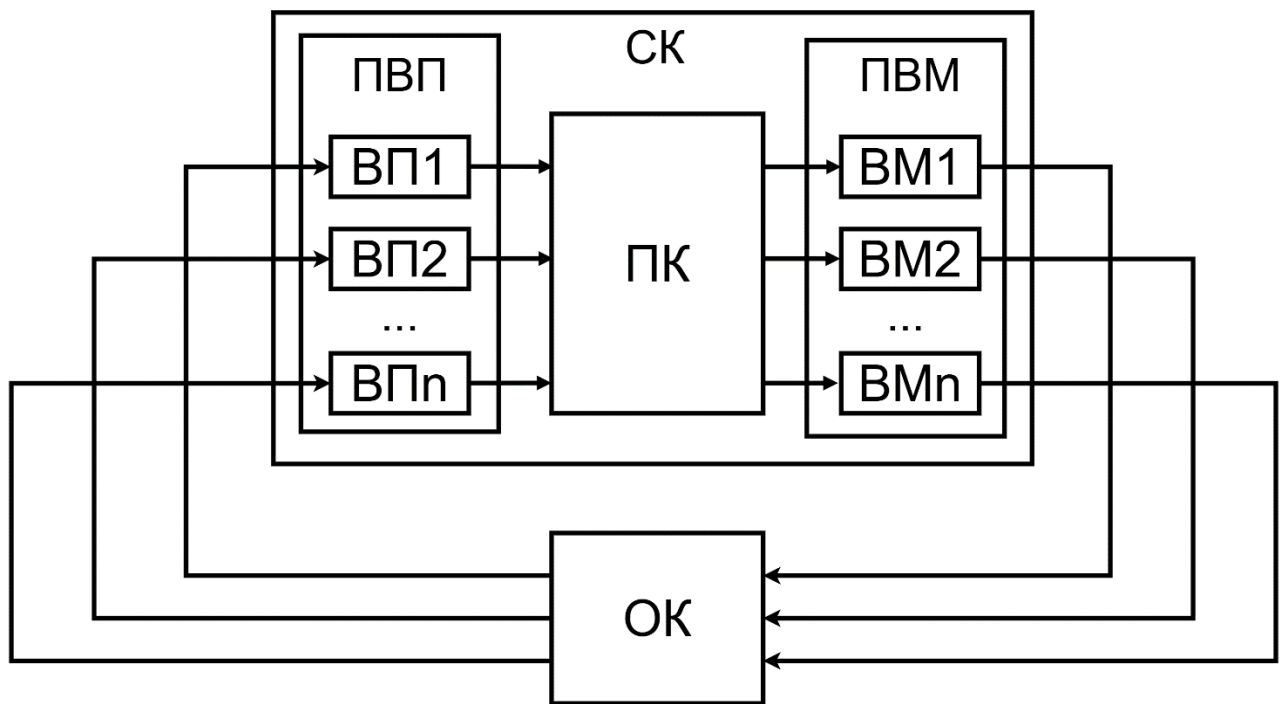


Рисунок 1.1. Структура автоматизованої системи

Схема яка зображена на рисунку описує замкнену схему автоматизації. Центральний елемент у ролі ПК виконує усі необхідні операції з приймання вхідних сигналів, обчислення та формування вихідних сигналів. Вихідний сигнал керування надходить на підсистему виконавчих механізмів (ПВМ), який включає у своєму складі усі необхідні ВМ, наприклад двигуни, і в свою чергу здійснюють вплив на ОК. Вимірювальні пристрої, які утворюють підсистему вимірювальних пристроїв виконують вимірювання певних параметрів ОК і надсилають отримані показання на ПК, для подальшої обробки та формування оновлених значень для вихідного сигналу керування.

Важливо зазначити, що на ОК здійснюється вплив певних збурюючих факторів, які представляють собою різні внутрішні та зовнішні чинники, що спотворюють вихідний результат.

Також збурюючий вплив можна охарактеризувати наступним чином [3]:

1) головний збурюючий вплив - порушення кількісного співвідношення між надходженням і витратою речовини або енергії у системі при зміні навантаження об'єкта, що є основним фактором у роботі будь-якої технічної системи або процесу;

2) додатковий збурюючий вплив - пов'язаний з порушенням кількісних факторів у системі, зокрема це - зміна якості робочих агентів, що надходять у систему для зміни її стану; зміна режиму живлення в системі як в об'єкті, так і в регуляторі. У свою чергу зміна якісних факторів призводить, незалежно від навантаження регульованого об'єкта, до зміни кількісних співвідношень і відповідно викликає збурення системи.

1.2. Автоматизація та цифрові технології в аграрному секторі промисловості

Загалом цифровізація агробізнесу полягає [5] у впровадженні сучасних технологій, систем моніторингу та аналітики даних для прийняття зважених обґрунтованих рішень. Це у свою чергу сприяє покращенню та оптимізації агропромислових процесів, підвищенню якості вихідного продукту, зменшенню втрат, а деяких задачах навіть забезпечує ефективну боротьбу зі шкідниками та захворюваннями.

Цифровізація агробізнесу передбачає інтеграцію та подальше активне використання цифрових технологій у різних сільськогосподарських екосистемах на різних рівнях виробництва продукції [5].

Такий підхід надає можливість підвищити ефективність багатьох бізнес-процесів, до яких відноситься планування сільськогосподарських операцій,

					<i>ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ</i>	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

фінансування, формування звітності, моніторинг виконання сільськогосподарських робіт та ін.

Перелік ключових цифрових технологій які використовуються та можуть бути потенційно застосовані у агробізнесі зображено на рис. 1.2.

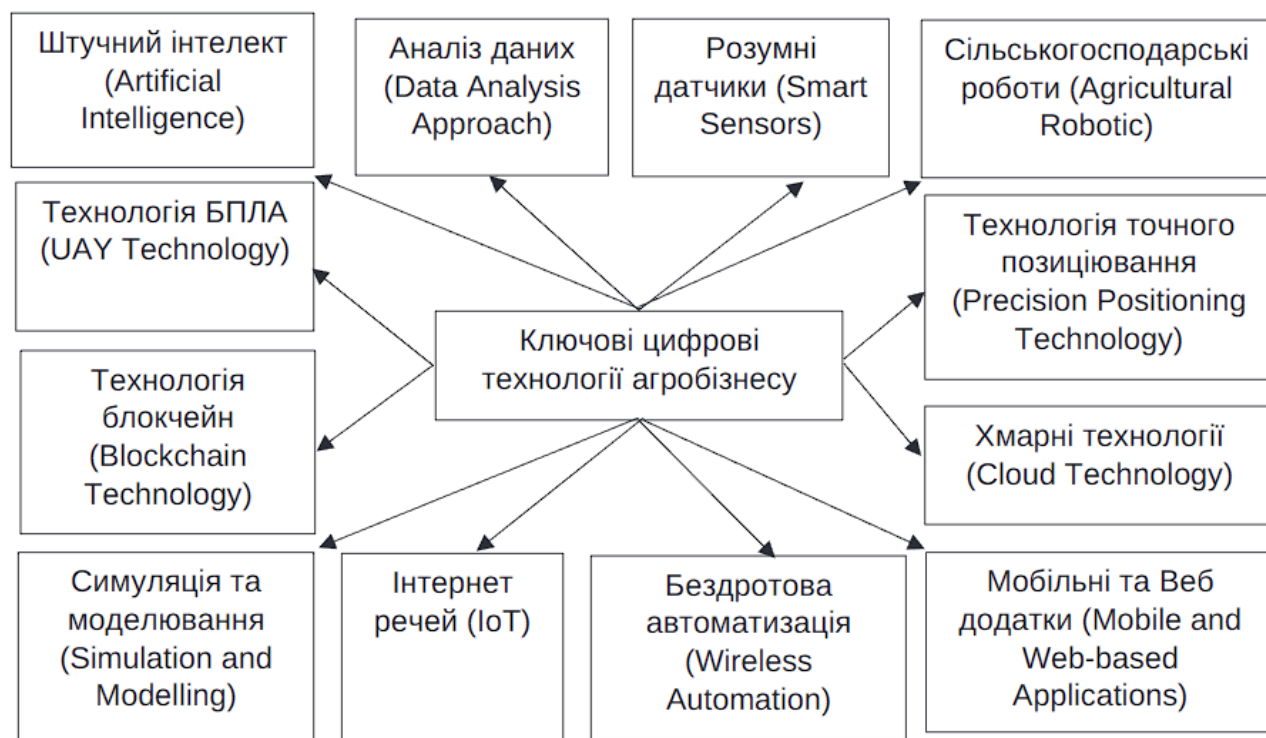


Рисунок 1.2. Схема основних цифрових технологій, що застосовуються у сфері агробізнесу [5]

Розглянемо детальніше перелік нових напрямків у сфері автоматизації процесів аграрно промислового сектору [6]:

1) IoT-технології - передбачає застосування спеціальних пристроїв, які у свою чергу мають доступ до мережі, та містять у своєму складі один або декілька вимірювальних пристроїв, які виконуються функції збору, перетворення та передачі даних про стан середовища в якому розміщені. Особливістю таких системи є те, що вони виконують збір даних у реальному часі та надсилають поточні показники через спеціальний додаток або на сервер, до якого має доступ оператор. В аграрній промисловості можуть використовуватися різноманітні

датчики, зокрема: ґрунту, температури та вологості, відстеження рослин і тварин, тощо. Інтеграція бездротових IoT-технологій оптимізує моніторинг бізнес-процесів, забезпечуючи швидкість, точність, зручність;

2) сільськогосподарська робототехніка - використання спеціалізованих роботів та робототехнічних систем забезпечують можливість виконання дій у різноманітних бізнес-процесах, тим самим прискорюючи їх. Такі системи можуть бути застосовані у задачах збору плодів, збирання врожаю, задач посадки, обприскування території, виконання посіву, рихлення землі, прополювання ділянок тощо. Особливо доречно застосовувати роботів для забезпечення автоматизації у виконанні повторюваних завдань, наприклад у вигляді автономних або напівавтономних систем з підтримкою GPS для збирання врожаю, системи які оснащені технологією автоматичного керування для полегшення навігації тощо. Також автоматизовані системи управління включають автоматизовані ваги, інкубатори, автоматичні годівниці, якщо розглядати застосування у сфері тваринництва. Загалом такі інтеграція таких систем надає можливість зосередити увагу на підвищенні загальних показників продуктивності та запобігати технічним помилкам;

3) штучний інтелект - впровадження IoT-технологій у сферу аграрної промисловості дозволяє виконувати задачі прогнозування, наприклад для передбачення рівня врожайності та цін, виконання планування посівів що є важливим питанням для формування графіків робіт тощо. Впровадження технологічних засобів, що використовують алгоритми штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання, надають можливості для здійснення аналізу показників, виявлення різних проблемних місць, або навіть у задачах визначення взаємопов'язаних параметрів у певному процесі та як вони впливають один на одного, а також виявляти приховані фактори впливу. Також у цій сфері можливе застосування технологій комп'ютерного зору, що може забезпечити виконання різноманітних задач виявлення візуальних невідповідностей тощо;

					<i>ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ</i>	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4) безпілотні літальні апарати (БПЛА) - призначені для збору необроблених даних та перетворення їх у форму, яка корисна для подальшої обробки і використання для задач цільового моніторингу. БПЛА, які оснащені камерами, виконують задачі аерофотозйомки, зйомку ближніх і далеких полів тощо. Ці дані є важливими для виконання задач оптимізації внесення добрив, насіння та засобів захисту рослин, а також зрошення. У задачах тваринництва вони можуть виконувати задачі спостереження та відстеження переміщення, а також стану тварин чи моніторинг території. БПЛА зі спеціальними камерами можуть надавати можливість виконання зображень, які варіюються від простих фотографій у видимому спектрі до мультиспектральних зображень, які дозволяють здійснювати аналіз врожаю, ґрунту та поля;

5) точне землеробство - передбачає використання у аграрній промисловості засобів виконання точних розрахунків та операцій, наприклад у задачах точного та дозованого використання кількості ресурсів – води, засобів захисту рослин, добрив, для підвищення якості врожаю тощо. Різні ділянки на полі можуть мати різні властивості ґрунту, різні схили, отримувати різну кількість сонячного світла. Відповідно, у наслідок однакового використання ресурсів для всього поля є неефективним та у свою чергу спричиняє різноманітні втрати.

У підсумку можемо визначити перелік основних переваг інтеграції цифрових технологій та робототехніки у цій галузі:

1) підвищення ефективності виробництва - автоматизація повторюваних операцій дозволяє зменшити залежність від людської праці, а також пришвидшити виконання певних операцій. Зокрема забезпечення точного планування та управління ресурсами зменшить загальні виробничі витрати;

2) оптимізація використання ресурсів - завдяки точності мінімізується надлишкове використання витратних матеріалів та ресурсів, як готовою продукції так і ресурсів для його утримання. Це має позитивні наслідки не тільки у контексті витрат, а і у контексті екологічного впливу;

					<i>ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ</i>	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3) покращення якості - забезпечення автоматизації моніторингу стану важливих параметрів дозволяє виявляти проблему заздалегідь і здійснювати дії для їх усунення;

4) зменшення людського фактору - автоматизовані системи виконують завдання з високою точністю та повторюваністю, що знижує потенційні помилки у наслідок втоми чи інших подібних аспектів з боку оператора;

5) оптимізація рішень щодо управління - автоматизація аналітичних процесів та інформації від IoT-систем надає можливість приймати обґрунтовані рішення щодо виконання певних задач, зокрема дозволяє виявляти проблемні місця або потенційні можливості для реалізації;

6) підвищення стійкості до збурень - автоматизація надає можливості до виконання адаптації до зміни завдяки гнучкому управлінні, що в свою чергу забезпечує стабільне виробництво;

7) розширення можливостей моніторингу - завдяки збору даних з датчиків у реальному часі з'являється можливість виконувати контролю параметрів роботи системи, витрати матеріалів, ресурсів, аналізувати час роботи тощо.

Разом з тим, впровадження цифрових технологій в агробізнесі стикається з низкою перешкод, які у свою чергу сприяють сповільненню процесів інтеграції цифрових систем, робототехнічних комплексів та засобів автоматизації. До таких перешкод можна віднести наступні [5]:

- висока вартість сучасного обладнання та ПЗ, витрати на навчання працівників для роботи з інтегрованими технологіями, можуть значно перевищувати переваги отримані у наслідок їх інтеграції у виробництво;

- використання застарілого обладнання, яке взагалі не сумісне з новими технічними засобами та системами, відсутність доступу до високошвидкісного Інтернету, що особливо актуально у віддалених сільських районах. Сукупність цих факторів значною мірою обмежує можливості використання переваг цифрових технологій;

					<i>ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ</i>	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- відсутність навчених спеціалістів, недостатній рівень підготовки працівників для роботи з сучасними автоматизованими системами, а також консервативний підхід та небажання змінювати традиційні методи роботи у свою чергу уповільнюють процеси інтеграції нових технологій;

- складність інтеграції цифрових технологій у вже наявні виробничі процеси, відсутність необхідних стандартів та сумісності між різними технологічними рішеннями, що не надає можливості забезпечити усі переваги використання засобів та рішень автоматизації.

1.3. Визначення мети та актуальності обраної теми. Формування переліку завдань

Метою роботи є проведення аналізу сучасних технологічних рішень та систем автоматизації, які застосовуються у сфері аграрної промисловості, з подальшим визначенням впливу на ефективність виробництва та якості продукції, зокрема у контексті виконання задачі вагового дозування зерна. У подальшому буде сформована структура системи та її приклад реалізації.

Актуальність теми полягає у необхідності впровадження сучасних цифрових технологічних рішень для аграрних господарств, що дозволяє стійкість та точність виробництва під час зростання вимог до якості продукції та раціонального використання природних ресурсів. Використання цифрових технологій, IoT, робототехніки та автоматизації дозволить забезпечити відповідність цим вимогам.

Завдання до цієї роботи включають:

1) виконати аналіз технічних засобів автоматизації виробничих процесів у аграрній промисловості;

2) описати принцип роботи та функцій автоматизованої системи дозування;

					<i>ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ</i>	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3) визначити способи вагового дозування та розробка структурної схеми системи;

3) на основі структурної схеми та способу дозування виконати розробку принципової схеми системи;

4) розробити та описати алгоритм роботи програмного забезпечення автоматизованої системи дозування зерна;

5) виконати моделювання роботи автоматизованої системи вагового дозування зерна з подальшим аналізом отриманих результатів.

1.4. Висновки до розділу 1

У розділі було виконано розгляд теми сутності та принципів автоматизації процесів і у результаті визначено, що автоматизації є необхідною мірою для забезпечення стабільності, ефективності та технологічності виробництва.

Автоматизовані системи керування дають змогу мінімізувати залежність від людської праці, що у свою чергу сприяє підвищенню точності виконання операцій, забезпечує оперативну реакцію на різноманітні зміни та збурення, а також сприяє оптимізації використання ресурсів.

Сучасні тенденції розробки цифрових технологій, зокрема у сфері агропромислового комплексу, вказують на розширення можливостей інтеграції та застосування цифрових технологій, зокрема систем моніторингу, інтернет речей (IoT), штучного інтелекту, аналітики та автоматизації.

Таким чином автоматизація є не тільки технічним процесом, а й повноцінним стратегічним напрямком розвитку промисловості, що забезпечує стале функціонування аграрної промисловості в умовах глобальних викликів та загроз.

					<i>ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ</i>	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. АВТОМАТИЗОВА СИСТЕМА ВАГОВОГО ДОЗУВАННЯ. ПРОЦЕС ДОЗУВАННЯ. СТРУКТУРА СИСТЕМИ ТА ПРИНЦИП РОБОТИ. ОГЛЯД ВИМІРЮВАЛЬНИХ ДАТЧИКІВ

2.1. Процес дозування та способи виконання дозування. Загальні аспекти системи автоматизованого вагового дозування

Для початку необхідно визначити поняття дозування. Відповідно дозування - є процесом відмірювання певної кількості заданої речовини чи матеріалу, шляхом визначення її маси, об'єму тощо.

Якщо розглядати дозування більш детально, його можна описати за [7]:

- 1) за видом робочого циклу - безперервним або порційним;
- 2) за принципом дії - об'ємним або ваговим.

У процесі безперервного дозування потік речовини чи матеріалу, який виходить із дозатора, безперервно зважується і залежно від результатів зважування, робота дозатора постійно піддається коригуванню.

Під час виконання процесів фасування [7] використовуються методи порційного дозування, суть якого полягає у періодичному повторенні циклів вимірювання кількості матеріалу та подальшої подачі її на упаковування після досягнення необхідного результату.

Відповідно для виконання задачі порційного дозування використовуються спеціальні пристрої [7]:

- об'ємні та вагові дозатори;
- вимірювачі об'єму та маси продукції;
- дозатори однакових штучних виробів.

У свою чергу **об'ємний спосіб дозування** [8] ґрунтується на принципі заповнення матеріалом чи речовиною певного визначеного доступного простору у ємності, та використовує для опису стандартні одиниця вимірювання, зокрема см³, літри тощо.

					<i>ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ</i>	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Об'ємний спосіб дозування переважно застосовується [8] у задачах дозування різних рідин, паст, газів, але також у певній мірі може використовуватися для дозування різноманітних сипучих матеріалів, що також актуально у процесі дозування зерна.

Об'ємні дозатори зазвичай мають просту конструкцію [8], яка містить певний набір ємностей, у процесі заповнення яких і відбувається сам процес дозування. Дозатори такого принципу дії більш доречні для застосування у складі фасувальних апаратів з невеликою дозою і незмінною упаковкою типу. І відповідно їх використання для формування великих доз, або в складі виробничих ліній, де важливим параметром є забезпечення високого рівня точності, що у свою чергу є важливим для відповідності визначеної рецептури і гарантії якості отримуваної продукції - є недоцільним технологічним рішенням.

Важливо зауважити, що використовуючи об'ємні дозатори неможливо забезпечити високу точність дозування сипких матеріалів. Це обгрунтовано впливом фізико-механічних властивостей сипучих матеріалів, таких як: вологість, фракція, ступінь ущільнення. Доза прямо залежить від розміру дозуючої ємності та відповідно неможливо її оперативно змінити [8].

У свою чергу **ваговий дозатор** працює за принципом засипання продукту у ваговий ківш до досягнення певного визначного оператором і відповідно, коли необхідний показник досягнута, система зупиняє процес подачі матеріалу у ківш, і в подальшому висипає або передає дозовану кількість матеріалу на наступний етап технологічного процесу.

Ваговий дозатор [8] сипучих компонентів характеризується забезпеченням високої точності дозування, так як оснащений відповідними високоточними ваговимірювальними пристроями. А також автоматизовані системи дозування та зважування можуть реалізувати режим виконання ітерацій досипання для забезпечення точного дозування.

Використання методів вагового дозування не потребує особливих умов та дозволяє раціональніше використовувати матеріали, швидко змінювати

					<i>ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

рецептуру, та що найголовніше забезпечувати та зберігати протягом тривалого часу показник високої точності. Тому вагове дозування сипких матеріалів та компонентів застосовується всюди де наявна потреба виконання фасування у тару різного типу та форми, зважування та дозування на лініях середньої і великої продуктивності тощо [8].

Для дозування рідин можуть бути використані як вагові дозатори, так і об'ємні. Спосіб застосування у такому випадку аналогічний відносно сипучих компонентів.

На даний момент вагові дозатори поступово витісняють об'ємні, так як вони забезпечують стабільно високий результат відповідності щодо вимог до кінцевого продукту, відповідності рецептурі та оперативність при зміні дози у разі виникнення такої необхідності [8].

Об'ємне дозування в свою чергу передбачає подальший перерахунок одиниць вимірювання - мілілітри\літри у вагові - а саме грами\кілограми, для виконання задач обліку на підприємстві. Використання вагових дозаторів є зручнішим для задачі ведення обліку, оскільки виключає неточності при перерахунку величин [8].

Дозатори також можуть розрізнятися згідно режиму їх роботи [7]:

1) дозатори періодичної дії - здійснюють подачу матеріалів заданими порціями згідно певних часових проміжків або запитом; частота подачі та маса порцій задаються програмними засобами;

2) дозатори неперервної дії - здійснюють подачу матеріалів безперервно; відповідно кількість матеріалу, що подається в тару регулюється шляхом зміни швидкості та часу дозування.

Зокрема процес дозування визначається його основними характеристиками, а саме:

- продуктивністю.
- точністю дозування.

					<i>ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ</i>	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У свою чергу показники продуктивності дозування безпосередньо пов'язані з конструкцією системи самого дозатора, який використовується у системі дозованого зважування [9].

Теоретична продуктивність дозатора визначає сумарний час циклу, а сам цикл дозування визначається наступним переліком технологічних переходів [9]:

- 1) наповнення мірного обсягу;
- 2) перенесення мірного обсягу на позицію фасування;
- 3) спорожнення мірного обсягу та заповнення тари;
- 4) перенесення мірного обсягу на вихідну позицію.

Основним показником системи вагового дозування, як і будь-якої іншої, є - показник точності дозування. Точність у свою чергу являє собою міру відповідності фактичного результату до необхідного.

На забезпечення показника точності може впливати низка факторів, які спричиняють похибки вимірювання та дозування. На рис. 2.1 наведено класифікацію чинників, які впливають на забезпечення точності дозування.

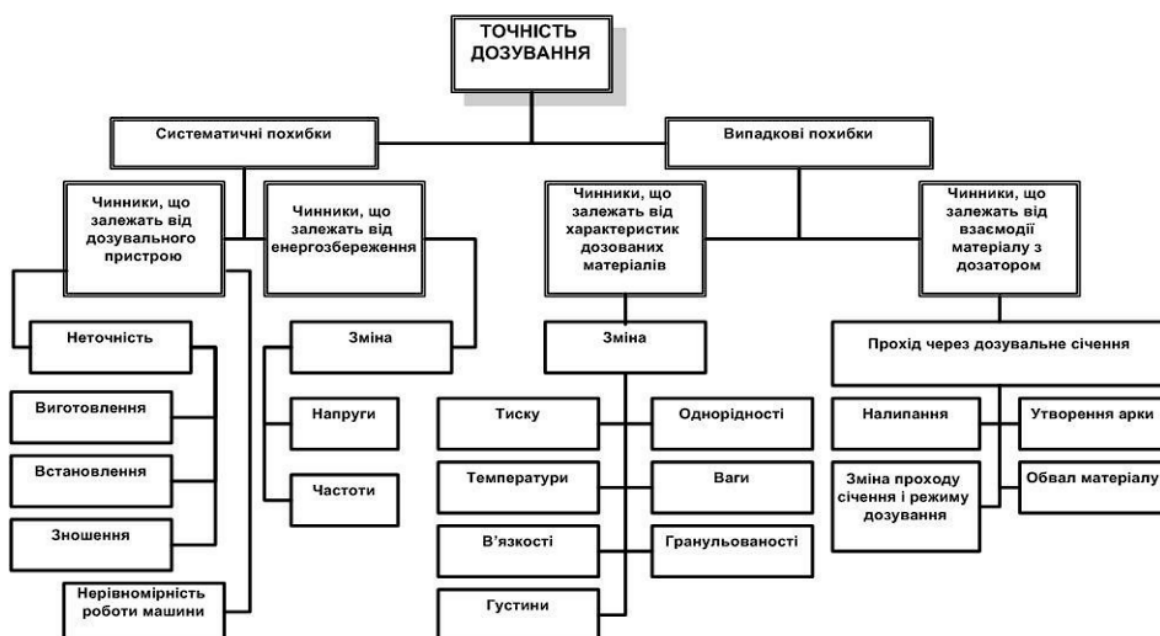


Рисунок 2.1. Класифікація чинників, що впливають на точність дозування[9]

Згідно рисунку, можна визначити що на забезпечення оптимальної точності дозування впливає ряд наступних чинників:

- 1) ступінь заповнення бункера;
- 2) нерівномірність подачі матеріалу в дозувальний механізм;
- 3) характер взаємодії матеріалу з механізмами самого дозатора;
- 4) зміна властивостей матеріалу в процесі дозування під впливом зовнішніх чинників.

2.2. Розробка та опис структурної схеми системи. Центральна обчислювальна система

2.2.1. Розробка загальної структури системи АСВДЗ

У цьому розділі буде розроблено та опису структурну схему автоматизованої системи дозування зерна. Структурна схема у свою чергу є способом представлення, у даному випадку системи вагового дозування, у вигляді блоків та зв'язку між ними, таким чином утворюючи загальну структуру цілісної системи. На рис. 2.1. відображено загальну структурну схему АСВДЗ.

надається за запитом до авторів

Рисунок 2.1. Структурна схема АСВДЗ

Розглянемо детальніше кожен елемент розробленої структурної схеми:

1) обчислювальна система (ОС) - є центральним елементом системи, яка об'єднує у собі управління усіма наявними блоками, виконуючи формування сигналів керування виконавчими механізмами, а також приймаючи сигнали з датчиків для подальшої обробки. Також цей блок є посередником між системою та оператором, так як передає дані для відтворення на моніторі, приймає дані на вхід та забезпечує дистанційний зв'язок;

					<i>ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ</i>	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2) блок підключення вимірювальних пристроїв (БПВП) - являє собою спеціальний блок, який є посередником між ОС та датчиками і забезпечує зв'язок і передачу вимірюваних сигналів. До БПВП підключені датчики наповнення, температури та вологості, в також тензодатчик у складі вагового дозатора:

- датчик наповнення призначений для того, щоб система могла визначити поточний рівень наповнення ємності з матеріалом, це необхідно для того щоб контролювати залишки після кожного етапу дозування;

- датчики температури та вологості необхідні для того, щоб контролювати показники температури та вологості середовища у якому перебуває матеріал. У контексті задачі це є важливим, так як правильні умови зберігання зерна забезпечують його якість та відповідно правильне функціонування системи дозування;

- тензодатчик виконує безпосереднє вимірювання ваги для забезпечення точного дозування матеріалів;

3) блок підключення виконавчих механізмів (БПВМ) - є посередником між ОС та виконавчими механізмами системи, і призначений для того, щоб ці механізми точно та надійно працювали. У складі системи виконавчих механізмів наявні:

- вібраційна система яка виконує вібраційні коливання платформи і таким чином наповнює ємність для дозування;

- заслінка, яка виконує роль функції видачі зваженої частини зерна для подальшого якогось процесу, обробки, транспортування тощо;

4) блок оператора (БО) - є підсистемою, яке є посередником між ОС та засобами виведення, введення, передачі та отримання даних. До цієї частини входять наступні елементи:

- монітор для виведення даних про стан системи, її показники та поточний процес на місці;

- система введення, яка призначена для керування чи введення даних від оператора на місці;

					<i>ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ</i>	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- система передачі даних (СПД), є елементом який призначений для передачі чи приймання даних на відстані, що в свою чергу забезпечує віддалений контроль та керування в режимі реального часу.

2.2.2. Будова мікропроцесорної центральної обчислювальної системи

Вибір обчислювального блоку є дуже важливим процесом, від результату якого залежать подальші технічні можливості, функціональність та точність системи загалом.

Центральна обчислювальна система (ЦОС) призначена для виконання наступного переліку функцій (у контексті обраної теми):

- зчитування сигналів від тензодатчиків - зчитування та перетворення аналогового сигналу в цифровий для подальшої обробки;
- виконання обробки даних - сюди відносяться розрахунки, алгоритми фільтрації, компенсації тощо;
- прийняття рішень щодо управління на основі отриманих результатів обробки даних. Сюди можна віднести управління виконавчими механізмами та формування даних для оператора;
- формування сигналів керування для управління виконавчими пристроями;
- формування звітів та передача даних на зовнішні системи, налаштування взаємодії з модулями передачі даних тощо.

Будь-який контролер будується на основі мікропроцесорної системи з набором периферії, портів та інтерфейсів для зовнішнього підключення модулів. Контролери системи будуються на основі мікроконтролерів (МК), які є основним обчислювальним ядром. Типову структуру мікропроцесора, яка відображає ключові блоки та зв'язки між ними зображено на рис. 2.2.

					<i>ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ</i>	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

надається за запитом до авторів

Рисунок 2.2. Типова структурна схема мікропроцесора [19]

Розглянемо детальніше складові блоки мікроконтролера та їх призначення:

1) центральне ядро (ЦЯ) - основним призначенням є виконання програного коду та алгоритмів, зчитування та обробка даних, управління інтерфейсами тощо. Варто зазначити, що ядро працює на певній частоті, яка визначає яку кількість команд за секунду може виконати МК, тобто відображає показник швидкодії;

2) АЦП/ЦАП - призначені для перетворення вхідного аналогового сигналу в цифровий для обробки на ЦЯ, або навпаки перетворення цифрового сигналу в аналоговий. Цей блок є невід'ємною складовою МК, так як забезпечує можливість зчитувати дані з датчиків;

3) периферійні інтерфейси - представляє собою спеціальний визначений блок зі способом взаємодії, зазвичай призначених для обміну даними між МК та периферійними пристроями, комп'ютером тощо. Можна виділити ряд найпоширеніших інтерфейсів:

- UART який використовується для передачі даних на невелику відстань, забезпечує високу швидкодію та працює за допомогою двох шин - RX (приймач) та TX (передавач);

- I2C, який представляє собою інтерфейс для підключення декількох пристроїв до однієї шини, яка складається з лінії адреси SDA та лінії синхронізації SCL. Особливістю інтерфейсу є те, що він забезпечує взаємодію з пристроями через їх адресу, яка є унікальною для кожного підключеного елемента на спільній шині. Варто зауважити що цей інтерфейс забезпечує повільнішу передачу даних у порівнянні з UART та SPI, але надає можливість підключити більше одного пристрою;

					<i>ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ</i>	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- SPI для швидкісної взаємодії, зазвичай за допомогою даного інтерфейсу підключають дисплеї, накопичувачі, датчики з високою частотою зчитування даних тощо;

4) таймери та ШІМ - часто використовуються для формування сигналів управління, регулювання, або формування переривань. Здатні забезпечити точне вимірювання та керування процесами шляхом формування точних часових проміжків. Але варто зауважити що точність значною мірою залежить від розрядності блоку, відповідно чим вище розрядність, тим ширший діапазон допустимих значень;

5) блоки пам'ять - у складі МК зазвичай наявна оперативна пам'ять для зберігання проміжних результатів обчислень та даних, а також постійна для зберігання програм, налаштувань, параметрів та інших важливих даних;

6) системні модулі - сторожові таймери для запобігання зависанню, системний годинник реального часу для точної синхронізації виконання процесів тощо.

У поєднанні усі вище перераховані блоки надають необхідний перелік функціональних можливостей для побудови автоматизованої системи керування, зокрема для автоматизованого вагового дозування.

2.3. Розробка та опис функціональної схеми системи

У цій частині буде розроблено та описано функціональну схему АСВДЗ. У свою чергу функціональна схема є графічним представлення функціональних елементів системи та їх взаємодії. Також вона відображає які функції виконують окремі блоки та яким чином між собою взаємодіють. Розроблену функціональну схему АСВДЗ зображено на рис. 2.3.

надається за запитом до авторів

Рисунок 2.3. Функціональна схема АСВДЗ

					<i>ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ</i>	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Дана схема відображає процес вагового дозування, відповідно у ній відображено бункер з сипучим матеріалом. Даний бункер слугує ємністю зберігання матеріалів для їх подальшого використання.

Під бункером наявна вібраційна платформа, на яку з бункера потрапляє сипучий матеріал. До цієї платформи у свою чергу під'єднано вібраційну систему (ВС) для генерації коливань.

Для забезпечення керування ВС у блоці керування передбачено спеціальний блок – підсистему виконавчих механізмів (ПВМ), яка виконує пряме керування ВС формуючи сигнал керування $U_{кер}$. Також важливо зазначити що цей сигнал перед тим як потрапити на вхід ВС проходить через підсилювач сигналу (ПС).

Використання ПС необхідно для того, щоб слабкий сигнал керування не спотворив вихідний результат, тобто забезпечив оптимальну точність. ПВМ у свою чергу керується блоком центральної системи (ЦС) на вхід якої подається задане значення $x_{вх}$, що відображає певний параметр чи набір параметрів згідно яких повинно виконуватися вагове дозування матеріалів.

Після вібраційного впливу матеріал рівномірними частинами потрапляє до ємності де виконується безпосередньо зважування. До ємності підключено тензодатчик (Т), який виконує вимірювання змін маси в ємності в реальному часі і передає виміряний сигнал $U_{вим}$ на підсистему вимірювальних пристроїв (ПВП). Перед тим як цей сигнал потрапить на вхід ПВП він також підсилюється блоком ПС, для того щоб забезпечити максимальну точність показників.

Відповідно після того, щоб сигнал було підселено та прийнято ПВП формується вихідне значення зворотного зв'язку $x_{зз}$ (33), який після потрапляє на вхід ЦС, яка вже виконує аналіз та подальші дії щодо керування процесом дозування та подальшої передачі вихідного матеріалу.

Також ЦС формує вихідний показник $x_{вих}$, який використовується для подальшого відображення на боці оператора.

					ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таким чином система забезпечує безперервний та точний процес вагового дозування сипучим матеріалів.

2.4. Огляд високоточних вимірювальних датчиків та їх характеристик

У цій частині дипломного проєкту буде виконано огляд датчиків які реалізують основну функцію вимірювання ваги у процесі дозування. Першим датчиком для розгляду взято **LUH-F** від **KYOWA** (див. рис. 2.4).



Рисунок 2.4. Зовнішній вигляд датчика ваги LUH-F від KYOWA [20]

Основними технічними характеристиками даного датчика, згідно технічної документації [20] є такі:

- 1) нелінійність $\pm 0.02\%$ від номінального верхнього значення навантаження (НВС);
- 2) гістерезис: 0.02% від НВС. Цей показник відображає незначну різницю між навантаженням при зростанні та спаданні;
- 3) повторюваність: 0.02% від НВС. Даний показник, у контексті датчика, відображає що він здатний забезпечити стабільні показання при повторюваних вимірюваннях;

4) дрейф нуля: не перевищує 0.02% від НВС. Цей показник є важливим, так як датчик передбачається для тривалого використання, що мінімізує необхідність перекалібрування;

5) значення номінального вихідного сигналу: $\pm 2\text{мВ/В}$ при деформації $4000 \cdot 10^{-6}$ з допустимим відхиленням $\pm 0.1\%$.

Даний датчик здатний забезпечити повторювані та точні вимірювання у системі вагового дозування зерна. **У підсумку можна визначити ряд його ключових переваг для застосування:**

1) висока точність вимірювання – до 1/5000 частини повного діапазону, що надає можливість забезпечити точний контроль за дозуванням, зокрема сипучих матеріалів;

2) надає можливість виконувати вимірювання як сил розтягу, так і стиску – надає більше можливостей для застосування;

3) характеризується низьким дрейфом нуля – забезпечить тривалий час стабільної роботи без спотворення вихідного результату;

4) виконаний таким чином, що допускає встановлення датчика на віддалених об'єктах.

Конструктивне виконання датчика зображена на рис. 2.5.

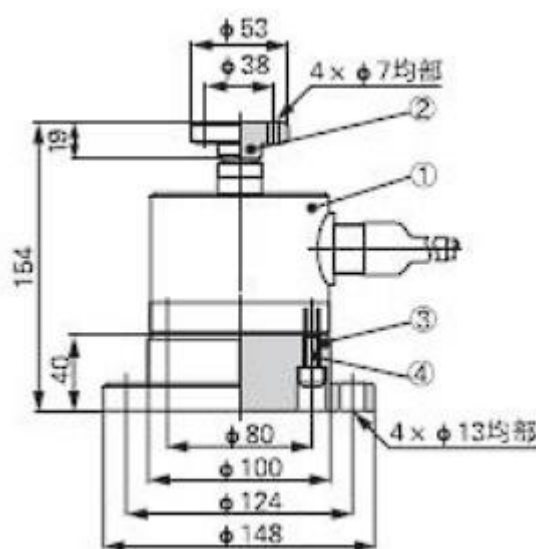


Рисунок 2.5. Конструкція датчика ваги LUH-F від KYOWA [20]

					ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

Наступним пристроєм на розгляд є датчик сили **LSM-B-SA1**, також від виробника KYOWA (див. рис. 2.6).



Рисунок 2.6. Зовнішній вигляд датчика ваги LSM-B-SA1 від KYOWA [20]

Даний датчик, у порівнянні з попереднім має важливу відмінність – здатність виконувати вимірювання у трьох координатних площинах. Відповідно що використання одного датчика для вимірювання у трьох площинах є доцільним для деяких задач, але для поточної цілі вимірювання ваги зерна є недоцільним. Важливо зауважити що такого типу датчики мають вищу цінову категорію.

Згідно наданої технічної документації даний датчик володіє наступними технічними характеристиками:

- 1) нелінійність $\pm 0.5\%$ від номінального верхнього значення навантаження;
- 2) гістерезис: 0.5% від НВС;
- 3) значення номінального вихідного сигналу: $\pm 0,5\text{мВ/В}$ при деформаціях $1000 \cdot 10^{-6}$;

					<i>ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ</i>	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Відповідно, основними перевагами даного датчика є:

- 1) компактність та легка вага, що надає можливість використовувати датчик у системах які мають обмеження щодо розмірів;
- 2) може бути застосованим у проведенні модельних експериментів;
- 3) надає можливість одночасного вимірювання у трьох координатних площинах.

Конструктивно виконаний наступним чином (див. рис. 2.7).

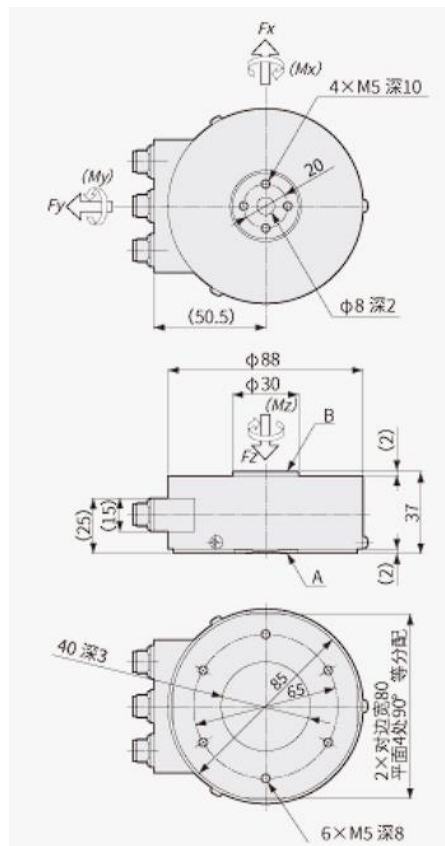


Рисунок 2.7. Конструкція датчика ваги LSM-B-SA1 від KYOWA [20]

Зазвичай такого типу датчики складаються з основного чутливого елемента на якому розміщені тензорезистори, які розташовані таким чином, щоб охопити вимірювання в певній площині.

Вихідні сигнали з тензоперетворювачів (ТП) на кожній осі обробляються незалежно один від одного, що у свою чергу дозволяє аналізувати кожну

компоненту окремо, виконувати фільтрацію, будувати графіки впливу навантаження тощо.

Наступним датчиком на розгляд обрано **U93 від HBM** (див. рис. 2.8).



Рисунок 2.8. Зовнішній вигляд датчика ваги U93 від HBM [21]

U93 від HBM є високоточним тензOMETричним перетворювачем [21], який розроблений для статичних та динамічних вимірювань у промислових умовах. Зокрема його компактні розміри та наявність фланцевого кріплення з обох боків, його можна легко інтегрувати у виробничі лінії з обмеженим робочого простору.

Згідно технічної документації виробника [21] характеризується наступними параметрами:

- 1) номінальні межі вимірювання сили: 1кН, 2кН, 5кН, 10кН, 20кН, 50кН;
- 2) застосування: у процесі проведення статичних та динамічних вимірювань осьових сил;
- 3) клас захисту: IP67;
- 4) матеріал корпусу: нержавіюча сталь;
- 5) тип кабелю: екранований шестижильний.

					<i>ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ</i>	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зазначається, що даний датчик спеціалізований для використання у задачах, де необхідно забезпечити високий показник точності вимірювання, як у статичних, так і динамічних процесах.

Також виробник зазначає, що цей датчик виконаний за спеціальною технологією, яка дозволяє автоматично виконувати зчитування таких параметрів як: діапазон вимірювання, одиниці виміру тощо.

Такий підхід значно спрощує процес налаштування, скорочуючи час на введення в експлуатацію та мінімізуючи ризик помилок ззовні, що у свою чергу зменшує ризик потенційних витрат на обслуговування, а також пришвидшує процес впровадження контролю виробничих процесів.

Конструктивне виконання датчика зображено на рис. 2.9.

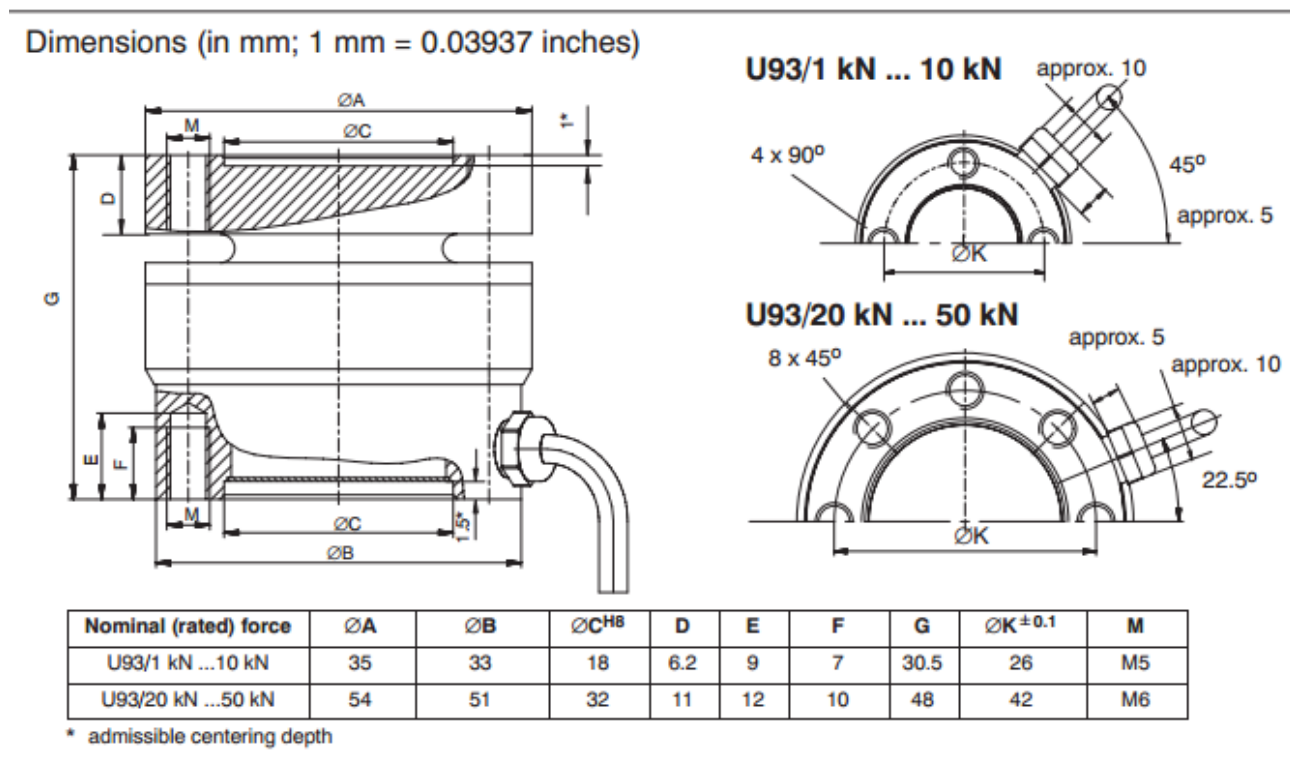


Рисунок 2.9. Конструкція датчика ваги U93 від HBM [21]

Наступним датчиком для огляду було обрано НМ14С від виробника Zemik (див. рис. 2.10).



Рисунок 2.10. Зовнішній вигляд датчика ваги НМ14С від Zemik [22]

Даний пристрій є тензометричним датчиком компресійного типу. Згідно опису він призначений для виготовлення та модернізації автомобільних, вагонних, багатотонних бункерних ваг, а також для використання у складі випробувальних стендів.

Ключові характеристики згідно технічної документації даного датчика включають [22]:

- 1) максимальне навантаження: від 10 до 50т;
- 2) максимальна кількість перевірочних інтервалів: 2000; 3000; 5000;
- 3) мінімальний перевірочний інтервал: $E_{max}/5000$; $E_{max}/10000$; $E_{max}/15000$;
- 4) загальна помилка: до $\pm 0.030\%$; $\pm 0.020\%$; $\pm 0.018\%$; $\pm 0.026\%$;
- 5) вихідне значення чутливості: 2.0 ± 0.004 мВ/В;

Конструкційне виконання датчика зображено на рис. 2.11.

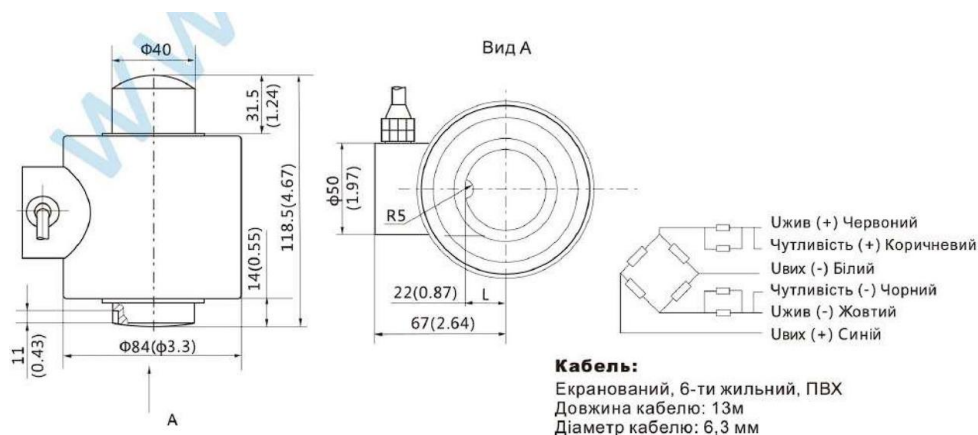


Рисунок 2.11. Конструкція датчика ваги HM14C від Zemik [22]

2.5. Висновки до розділу 2

У розділі було розглянуто питання технології дозування матеріалів, які застосовуються у різноманітних сферах зокрема в аграрній промисловості. Зокрема описано способи виконання дозування та технічні аспекти реалізації системи. Основну увагу було приділено ваговому дозатору, як найточнішому методу для заданої цілі.

На основі виконано аналізу було побудовано структурну схему системи АСВДЗ, яка описує основні блоки системи та взаємозв'язки між ними. Також виконано глибокий аналіз та опис розробленої структурної схеми. Дана схема надає можливість краще зрозуміти логіку взаємодії елементів системи та подальшого застосування.

Також розроблено функціональну схему системи, яка відображає усі функціональні блоки, а також детально описано їх роль у загальному процесі вагового дозування. Окрема розглянуто питання обробки та формування сигналів, а також роль блоків підсилення.

На основі даного розділу виконується подальший вибір та опис апаратних та технічних рішень системи.

					ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

3 ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ. ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ АЛГОРИТМУ АСВДЗ

3.1. Особливості системного програмування систем автоматизації

У цій частині роботи буде виконано розгляд питання розробки програмного забезпечення враховуючи особливості технічних засобів та сфери застосування. Для початку необхідно описати поняття програмного забезпечення.

Програмне забезпечення (ПЗ) - є найважливішою зі складових частин комп'ютерного забезпечення, яка передбачає наявність комп'ютерних програм та набору даних, які у свою чергу призначені для розв'язання визначеного переліку задач, яке відрізняється у залежності від напрямку застосування та системи на якість виконується розроблене ПЗ. У свою чергу ПЗ може бути набором даних для використання в інших спеціалізованих програмах, або алгоритмом, що реалізованим у вигляді послідовності інструкцій для виконання [12].

Важливо зауважити, що програмне забезпечення може сильно відрізнятися у залежності від цільової платформи і способу відтворення. У контексті розробки алгоритмів для автоматизованих чи роботизованих систем, які використовують у якості обчислювальної системи контролери або мікроконтролери, доречно використовувати поняття системного програмного забезпечення.

Системне програмне забезпечення - є набором програм або самостійним алгоритмом, що призначене для виконання управління складовими компонентами обчислювальної системи, зокрема такими як процесор, комунікаційні і периферійні пристрої, а також призначені для забезпечення функціонування і працездатності всієї системи [12]. Особливістю системного програмного забезпечення є роботи на низькому, апаратному рівні, тому

потребує поглиблених знань не тільки у програмування але й у електроніці та будові мікропроцесорної техніки.

Розробка програмного забезпечення є послідовним процесом, який включає у собі перелік різних етапів, від підготовчих до кінцевої підтримки та оновлення.

На початку виконується процес замовлення ПЗ, що у свою чергу визначає перелік робіт і завдання замовника. Важливо зауважити, що це стосується лише написання ПЗ на замовлення, а інших випадках цей етап включає аналіз цільової платформи та задачі з подальшим визначенням вимог, підходів до проєктування та побудови архітектури.

Етап замовлення на розробку складається з [10]:

- визначення вимог замовника до системи або ПЗ (визначення елементів бізнес-логіки);
- підготовки і випуску заявки на підряд;
- вибору постачальника і управління процесами замовлення;
- приймання системи або ПЗ.

Наступний процес - є постачання [10], який визначає перелік робіт і завдання постачальника. Зазвичай цей процес починається з рішення про підготовку пропозиції у відповідь на заявку від замовника, або з підписання договору на поставку системи чи ПЗ. У подальшому визначаються усі необхідні для управління і забезпечення проекту процедури, ресурси, витрати, які також включають процес розроблення проектних планів та їх подальше виконання.

Сам процес розробки складається з переліку робіт для виконання та завдань, які необхідно виконати розробникам. До процесу розробки можна віднести наступну послідовність етапів [10]:

- 1) підготовка процесу розроблення;
- 2) аналіз вимог до системи;
- 3) проєктування системної архітектури;
- 4) аналіз вимог до програмних засобів;

					<i>ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ</i>	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- 5) проектування програмної архітектури;
- 6) технічне проектування програмних засобів;
- 7) програмування і тестування програмних засобів;
- 8) складання програмних засобів;
- 9) кваліфікаційні випробування програмних засобів;
- 10) складання системи;
- 11) кваліфікаційні випробування системи;
- 12) введення в дію програмних засобів;
- 13) забезпечення приймання програмних засобів.

У свою чергу розробка ПЗ може включати розробку моделі. Зокрема модель будується для того, щоб краще описати систему, яку необхідно розробити і відповідно використання технологій моделювання дозволяє вирішити наступний перелік завдань [11]:

- 1) виконати візуалізацію системи у її поточному або цільовому стані;
- 2) виконати опис структури або поведінки цільової системи;
- 3) сформувати шаблон, який дозволяє в подальшому виконати конструювання системи;
- 4) виконувати документування прийнятих архітектурних та системних рішень, за допомогою використання моделі.

Чим масштабніше та складніше система, тим важливішого значення набуває виконання моделювання для її розробки. Модель дозволяє описати складну, багатофункціональну систему у зручному, зрозумілому вигляді для сприйняття, а також полегшує процес визначення функціональних блоків для подальшої фізичної реалізації.

Моделювання складної, багатогранної системи чи об'єкта дозволяє звузити проблематику, усунувши неважливі аспекти і зосередивши основну увагу виключно на ключових її аспектах.

Правильно обрана модель дозволяє створювати проекти на вищих рівнях абстракції [11].

					<i>ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ</i>	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.2. Розробка алгоритму роботи АСВДЗ

У цій частині виконується побудова алгоритму роботи системи автоматизованого дозування зерна. Блок-схема алгоритму зображена на рис. 3.1.

надається за запитом до авторів

Рисунок 3.1. Блок-схема алгоритму роботи АСВДЗ

Блок-схема відображає основну послідовність виконання етапів роботи програмного забезпечення системи та включає декілька блоків, а саме:

- порядок дій налаштування системи перед запуском;
- запуск основного циклу роботи з набором функцій для виконання;
- порядок дій правильного завершення роботи системи зі збереженням показників роботи.

Розглянемо детальніше кожен частину алгоритму роботи АСВДЗ. Першою частиною буде порядок дій налаштування перед запуском, що включає у собі перелік спеціальних перевірок (див. рис. 3.2).

надається за запитом до авторів

Рисунок 3.2. Фрагмент блок-схеми алгоритму роботи АСВДЗ. Налаштування роботи блоків системи

Порядок налаштування та перевірок виконується у наступній послідовності:

- налаштування системи тензодатчика та калібрування. Так як даний блок системи є ключовим для забезпечення точного дозування зерна. Якщо блок працює некоректно система сповістить про це оператора та зациклить даний етап до моменту виправлення проблеми;
- налаштування датчиків температури, вологості та рівня, виконання калібрування. Ця послідовність налаштувань призначена для перевірки та

					<i>ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ</i>	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

забезпечення необхідних умов для підтримки оптимальної якості продукту, а також для визначення залишків продукції у бункері;

- налаштування системи виконавчих механізмів. На даному етапі виконується перевірка справності роботи механізмів які виконують безпосередньо процес дозування, тому перевірка та налаштування їх роботи є необхідним та важливим процесом.

Після успішного налаштування усіх підсистеми виконується перехід до початку основного циклу програми (див. рис. 3.3).

Даний цикл виконує перевірку умови для запуску процесу послідовності дозування та вимірювання зерна з заданою точністю. Після того, як цикл запущено перевіряється умова досягнення цілі дозування, такою ціллю у даному випадку є отримання необхідного значення маси у ємності з дотриманням певного діапазону допустимої похибки.

Загальна похибка повинна визначитися таким чином, щоб враховувати похибки вимірювальної системи, системи дозування, а також межу допустимого відхилення від заданої маси кінцевого продукту.

У результаті перевірки умови досягнення цілі дозування є два варіанти розгалуження логіки, а саме не досягнуто цілі та досягнуто. У випадку коли ціль не досягнуто розпочинається послідовність етапів вимірювання, показників та сам процес дозування.

Першим показником який підлягає визначенню – це значення поточного рівня матеріалу у ємності.

надається за запитом до авторів

Рисунок 3.3. Фрагмент блок-схеми алгоритму роботи АСВДЗ. Тіло основного циклу алгоритму

Відповідно, якщо у ємності матеріалів менше допустимої межі, то система не зможе продовжити роботу до моменту наповнення бункера до оптимального значення.

					<i>ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ</i>	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Якщо ємність наповнена виконується вимірювання показників температури та вологості, для оцінки стану зерна та умов його зберігання. Після виконання етапів вимірювання, усі дані про температури, вологість та зміни рівня матеріалу у бункері відображаються на моніторі оператора.

Наступним етапом виконується запуск системи вібраційного механізму для дозування. Механізм запускається на певний проміжок часу.

Блок тензодатчика виконує вимірювання фактичного значення ваги після етапу дозування, і виводить даний результат на монітор. Фактичний показник порівнюється з заданим значенням в умові циклу. Відповідно, якщо показник не відповідає умові, то вся послідовність дозування та вимірювання повторюється до тих пір доки умова не буде виконана. У разі успішного завершення циклів дозування алгоритм повертається на початок запуску основного циклу, тим самим забезпечуючи повністю автоматичний процес дозування та вимірювання у відповідності до заданих допустимих відхилень.

У разі якщо зазначено що запуск ітерації дозування завершено, система переходить до етапу завершення роботи системи. Відповідно фрагмент алгоритму завершення роботи системи показано на рис. 3.4.

Завершення роботи системи передбачає коректне та послідовне завершення роботи складових елементів та модулів системи, для того щоб випадково не спричинити несправності та зберегти всі необхідні дані про попередні цикли роботи.

Процес завершення роботи цієї системи передбачає ряд наступних етапів у визначеній послідовності:

- завершення роботи вимірювальної системи тензодатчиків;
- завершення роботи системи вимірювання параметрів бункеру з матеріалом;
- завершення роботи виконавчих механізмів;
- збереження даних про результати роботи за період;

					<i>ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ</i>	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- виведення повідомлення про успішне завершення роботи усіх підсистем;
- завершення роботи центральної системи.

надається за запитом до авторів

Рисунок 3.4. Фрагмент блок-схеми алгоритму роботи АСВДЗ. Етап завершення роботи блоків системи

У підсумку можна зазначити, що розроблений алгоритм роботи АСВДЗ описує перелік основних функціональних задач, які повинна виконувати дана система.

3.3. Висновки до розділу 3

Розділ присвячено програмному забезпеченню та особливостям алгоритму роботи автоматизованої системи вагового дозування зерна.

У межах даного розділу було описано загальні аспекти ПЗ та циклу його розробки. Окремо визначено особливості системного ПЗ, яке призначене для виконання на мікропроцесорних системах, які входять у склад автоматизованих пристроїв, зокрема в АСВДЗ.

Визначено, що розробка програмного забезпечення є складним процесом, який включає послідовність дій починаючи від визначення цільової виконавчої платформи та формування архітектури, і закінчуючи написанням програмного коду та тестуванням. Зокрема зазначено, що написання системного ПЗ для автоматизованих систем потребує поглиблених знань у програмуванні та в будові мікропроцесорних пристроїв.

Було описано алгоритм та розроблено блок-схему АСВДЗ, яка представляє собою послідовність виконання інструкцій та перевірок, на основі яких виконується автоматизоване функціонування системи.

					<i>ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ</i>	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Блок-схема складається з трьох ключових частин, а саме початкового налаштування всіх складових системи, основного циклу функціонування, що реалізує функції зважування та дозування, та етап завершення роботи системи. Розроблений алгоритм повною мірою описує сутність системи згідно з вимогами до її функціонування.

4 ТЕНЗОМЕТРІЯ ТА РОБОТА ТЕНЗОМЕТРИЧНОГО ДАТЧИКА. МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ВАГОВОГО ДОЗУВАННЯ ЗЕРНА

4.1. Тензометрія. Тензодатчик та принцип його роботи. Точність тензодатчика

Тензометрія [17, 18] - це метод для виконання вимірювання деформацій, враховуючи найменші деформації у матеріалах та конструкціях, що виникають під дією зовнішніх та внутрішніх впливів. Основною метою даного методу є - визначення механічних напружень, і відповідно може бути застосованим у якості системи для вимірювання ваги.

Основний пристрій, який забезпечує вимірювання, називається **тензорезистивний перетворювач (ТП)**. В свою чергу тензорезистор (див. рис. 4.1) - це резистор, опір якого змінюється у залежності від зміни його лінійних розмірів під дією зовнішніх факторів [17].



					ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

Рисунок 4.1. Загальний вигляд тензорезистора: 1 - покриття; 2 - решітка; 3 - зовнішні дроти [17]

Тензорезистори конструкційно можуть виконуватися: дротяними; фольговими; напівпровідниковими. Геометричні розміри тензорезисторних перетворювачів дротяного та фольгового типу змінюються під дією деформаційного впливу [17].

Дротяний тензорезистор представляє собою решітку з дроту діаметром 0,02 – 0,05 мм., яка наліплена на основу, яка ще може називатись підкладкою, з тонкого паперу або лакової плівки. У якості матеріалу для дроту найпоширенішим у використанні є константан, який характеризується великим коефіцієнтом тензочутливості k , що у поєднанні з малим температурним коефіцієнтом опору забезпечує максимальну ефективність [17].

Важливо зауважити на тому, що вибір матеріалу з якого виготовлений тензорезистор має пряму залежність на перетворення деформації у вихідний сигнал, що враховується під час розрахунків.

Наклеювання тензорезисторів [17] - це процес, сутність якого полягає у розміщенні вимірювального елемента на цільовій платформі. Виконання цього процесу вимагає максимальної точності та обережності при виконанні окремих технологічних операцій. Також необхідно обрати оптимальний тип та перевірити працездатність тензорезисторів.

Відповідно, що тип застосовуваних тензорезисторів, їх конфігурація, геометричні розміри та опір залежать від розмірів і форми досліджуваної деталі, виду і характеру вимірюваної деформації [17].

Метод тензометрії заснований на дії закону електричного опору провідника та механічній деформації, сутність якого полягає у визначенні залежності зміни електричного опору тензодатчика від деформації, яку він зазнає під дією впливу. Відповідно коли тензодатчик, який прикріплений до поверхні

					<i>ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ</i>	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

тіла, піддається механічному впливу, то воно піддається деформації, наприклад стискається, або розтягується, і відповідно здійснює вплив на ТП.

Під дією цієї деформації змінюються наступні параметри:

- 1) довжина провідника - зростає у результаті дії розтягування, та зменшує унаслідок стискання;
- 2) переріз провідника - зменшується під дією сили розтягування, та збільшується унаслідок стискання;
- 3) відповідно зміна геометричних розмірів впливає на зміну електричного опору ТП.

У свою чергу параметр, який характеризує залежність цієї зміни називається коефіцієнтом тензочутливості, який відрізняється для кожного матеріалу.

Коефіцієнт тензочутливості дротяних тензорезисторів [17], що виконані з дроту константана становить $k = 2 \pm 0.2$, а значення номінального робочого струму $I = 0,3$ мА, зокрема максимальна деформація не повинна перевищувати показника 0,3%.

Тензодатчики мають спеціальне маркування, яке позначає ключові технічні характеристики конкретного ТП. Наприклад: ДКП-5-50Г; ДКП-20-200Х.

Позначення мають наступне розшифрування [17]: перша літера (Д) вказує, що решітка виконана з дроту; друга літера (К) - константан (матеріал дроту); третя літера (П) - матеріал основи (папір або плівка); цифри вказують на значення довжини бази та номінальний опір решітки; остання літера (Г або Х) - вказують на значення допустимої температури наклепки (Х - не більше 30 °С, Г - не більше 180 °С) (див. табл. 4.1).

Таблиця 4.1. Характеристики тензочутливих матеріалів [17]

Матеріал	S	d, мкм	ρ , Ом·мм ² /м	$\alpha_R \cdot 10^{-6}$, 1/°C
Константан МНМЦ-40-1,5	2,1	10; 20; 30	0,46 – 0,52	-20 – 110
Сплав НМ23ХЮ	2,2 ±0,05	10; 20; 30	1,45 – 1,60	< 35

					ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Матеріал	E , Па	σ_B , Па	ε_{lmax} , %	$\alpha_l \cdot 10^6$, 1/°C	t_{max} , °C
Константан МНМц-40-1,5	$1,48 \cdot 10^{11}$	$65 \cdot 10^7$	-	14 - 15	500
Сплав НМ23ХЮ	$2,1 \cdot 10^{11}$	$(130-150) \cdot 10^{11}$	> 18	11,5	500

Конструкційне виконання датчика зображено на рис. 4.2.

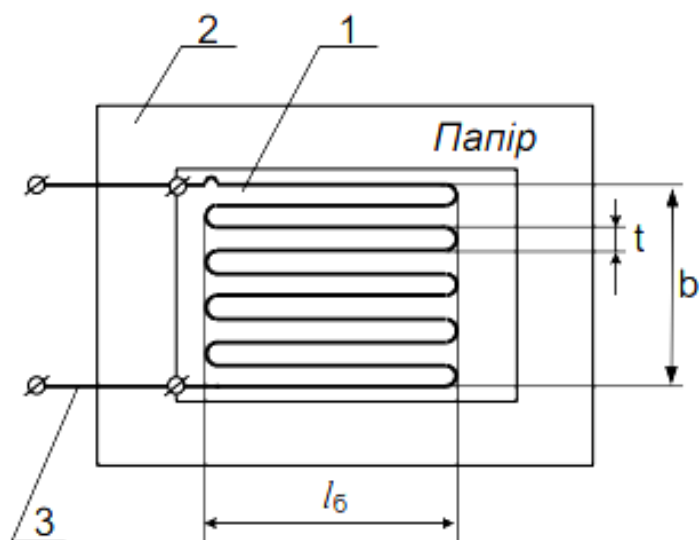


Рисунок 4.2. Конструкція наклеюваного дротяного ТП [18]

де:

b - ширина решітки;

l_0 - довжина петлі або база ТП, $l_0 = 5 - 25$ мм;

t - ширина петлі або крок петлі, $t \geq 2d = 0.8 - 10$ мм;

d - діаметр дроту ТП

Особливість ТП полягає у тому, що чутливий елемент (ЧЕ) по всій площині основи пов'язаний механічно з об'єктом дослідження.

Широкого застосування ТП отримали завдяки [17]:

– універсальності виконання вимірювання деформації, що обґрунтоване різними розмірами основи від 0,1 мм;

					ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- великій кількості точок вимірювань;
- виконання вимірювань за різних умов навколишнього середовища, зокрема: температури; вологості; тиску;
- незначній масі ТП;
- широкому частотному діапазону;
- високій чутливості та відносно низькій вартості;
- високій надійності.

У підсумку попереднього аналізу можемо виділити ключові переваги застосування ТП:

- малі маса і габаритні розміри;
- можливість вимірювати сталі та змінні деформації;
- можливість розміщувати їх у важкодоступних місцях;
- простота конструкції і дешевизна виконання.

Але в свою чергу володіє рядом наступних недоліків:

- наявність поперечної тензочутливості для дрітчастих ТП, яка становить 0,25–1% (у фольгових і неклеюваних ТП вона практично відсутня);
- мала потужність вихідного сигналу ТП.

Найбільш важливим показником ТП є точність. Відповідно клас точності вимірювальних пристроїв з ТП знаходиться у межах 0,2 - 1,5%.

Принцип дії перетворювача можна зобразити у вигляді наступної структурної схеми (див. рис. 4.3).

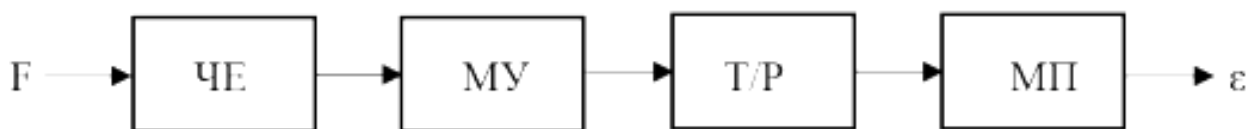


Рисунок 4.3. Структурна схема ТП [18]

Компенсація температурних похибок реалізується використанням мостової схеми із терморезисторами (Т/Р), яка живиться від мережі постійного струму або від літій-іонних акумуляторів. Сигнал з мостової схеми поступає на

мікропроцесорний перетворювач (МП) в якому за розробленим алгоритмом корегується вихідний сигнал [18].

Для того, щоб визначити активний опір провідника при незмінному показнику температури, необхідно скористатися виразом:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}, \quad (4.1)$$

де:

ρ - питомий опір матеріалу;

S - площа поперечного перетину.

Зміна опору провідника під впливом зовнішньої сили обумовлена зміною довжини і поперечного перетину, а також питомого опору матеріалу провідника.

В свою чергу зміна опору провідника під дією пружної деформації розраховується відповідно:

$$\Delta R = \frac{\partial R}{\partial l} \Delta l + \frac{\partial R}{\partial S} \Delta S + \frac{\partial R}{\partial \rho} \Delta \rho = \rho \frac{\Delta l}{S} - \rho \frac{l}{S^2} \Delta S + \frac{l}{S} \Delta \rho \quad (4.2)$$

Значення відносної зміни опору розраховується наступним чином:

$$\varepsilon_R = \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (4.3)$$

Мостова схема підключення тензорезисторів виконується наступним чином (див. рис. 4.4).

					ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

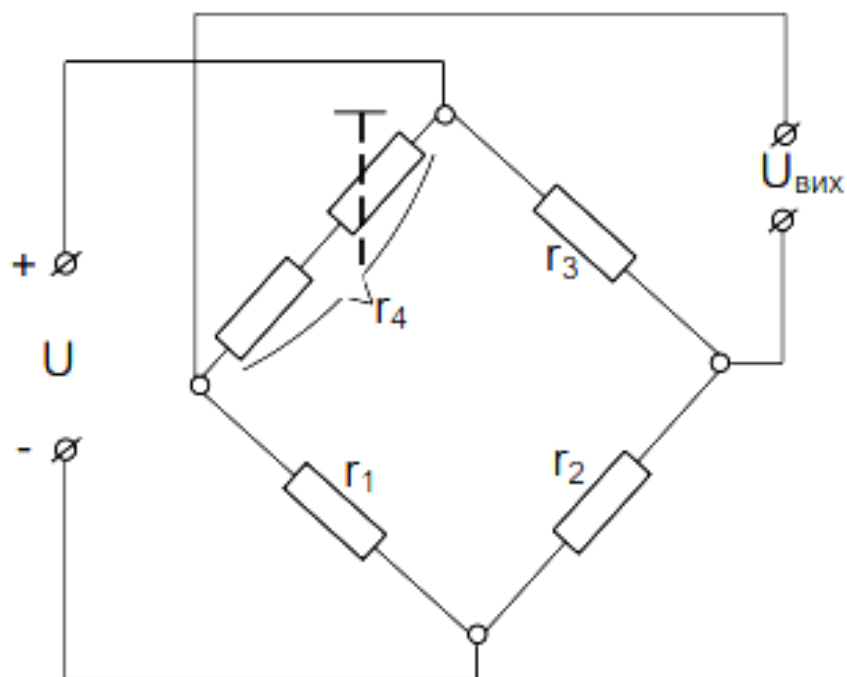


Рисунок 4.4. Мостова схема підключення ТП [18]

Відповідно розрахунок вихідної напруги при підключенні мостовою схемою виконується наступним чином [18]:

$$r_1 = r_D \quad \text{і} \quad r_2 = r_3 = r_4 = r_0 \quad (4.4)$$

$$U_{\text{вих}} = U \frac{r_D - r_0}{2 \cdot (r_D + r_0)} \quad (4.5)$$

Відповідно значення вихідної напруги буде:

$$r_1 = r_3 = r_D \quad (4.4)$$

$$r_2 = r_4 = r_0 \quad (4.5)$$

$$U_{\text{вих}} = U \frac{r_D - r_0}{r_D + r_0} \quad (4.6)$$

$$U_{\text{вих}} = U \frac{r_{D1} - r_{D2}}{r_{D1} + r_{D2}} \quad (4.7)$$

Перейдемо до виконання розрахунків основних геометричних параметрів чутливого елемента, враховуючи що деформації усіх балок ЧЕ однакові. Відповідно маємо:

$$|\varepsilon_{\tau 1}| = |\varepsilon_{\tau 2}| = |\varepsilon_{\tau 3}| = |\varepsilon_{\tau 4}| = |\varepsilon_{\tau}| \quad (4.8)$$

при $k = 1$.

Функцію перетворення можна визначити наступним чином:

$$U_{вих} = U_{жив} \frac{1}{4} k_T \cdot 4\varepsilon_{\tau} = U_{жив} k_T \cdot \varepsilon_{\tau} \quad (4.9)$$

де значення ε_{τ} визначається за законом Гука, згідно наступного виразу:

$$\varepsilon_{\tau} = \frac{\tau}{2G} \quad (4.10)$$

де значення G являє собою модуль пружності другого роду, який розраховується наступним чином:

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (4.11)$$

де:

E - модуль Юнга;

μ - коефіцієнт Пуассона;

τ - дотична напруга.

Значення дотичної напруги визначається згідно наступного виразу:

$$\tau = k_1 \frac{F}{bh} \quad (4.12)$$

відповідно де:

k_1 - коефіцієнт враховуючий форму поперечного перерізу балки;

F - вимірювача сила;

b - товщина балки;

h - висота балки.

На основі описаних вище виразів можемо визначити наступне:

$$U_{вих} = U_{жив} \frac{k}{(k+1)^2} k_m \cdot 4 \cdot \frac{\alpha M_{\max}}{2b\sigma h} \quad (4.13)$$

Наступним чином розраховується висота балки:

					ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$h = \frac{k}{(k+1)^2} k_T \cdot 4 \cdot \frac{\alpha M_{\max}}{2b\sigma} \frac{U_{\text{жив}}}{U_{\text{вих}}} \quad (4.14)$$

де:

$$\frac{U_{\text{жив}}}{U_{\text{вих}}} = \frac{1}{PKП}$$

У даному випадку використовується наступний показник $PKП_{\text{мех}} = 2 \cdot 10^{-3}$. Таким чином вираз для визначення значення висоти балки буде мати наступний вигляд:

$$h = \frac{(1+\mu)Fk_Tk_1}{8EbPbP_{\text{мех}}} = \frac{k}{(k+1)^2} k_T \cdot 4 \cdot \frac{\alpha M_{\max}}{2b\sigma \cdot PKП}$$

Для даного випадку було обрано балку товщиною $b = 10\text{мм}$, відповідно можемо розрахувати наступне:

$$h = \frac{k}{(k+1)^2} k_T \cdot 4 \cdot \frac{\alpha M_{\max}}{2b\sigma \cdot PKП} = \frac{1}{(1+1)^2} 1,8 \cdot 4 \cdot \frac{1,5 \cdot 5 \cdot 10^4}{2 \cdot 10 \cdot 210 \cdot 10^9 \cdot 2 \cdot 10^{-3}} = 8,5[\text{мм}]$$

Один із показників, які розраховуються для датчиків перетворення сили - це статична характеристика перетворювача. У загальному розумінні статична характеристика відображає залежність зміни вихідного значення величини від зміни вхідного значення величини у визначеному режимі та умовах.

Для розрахунку показника статичної характеристики використовується наступний вираз:

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{жив}} \cdot k_T \cdot k_1 \frac{(1+\mu) \cdot F}{8 \cdot E \cdot b \cdot h} \quad (4.15)$$

Графік статичної характеристики зображено на рис. 4.5.

					ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

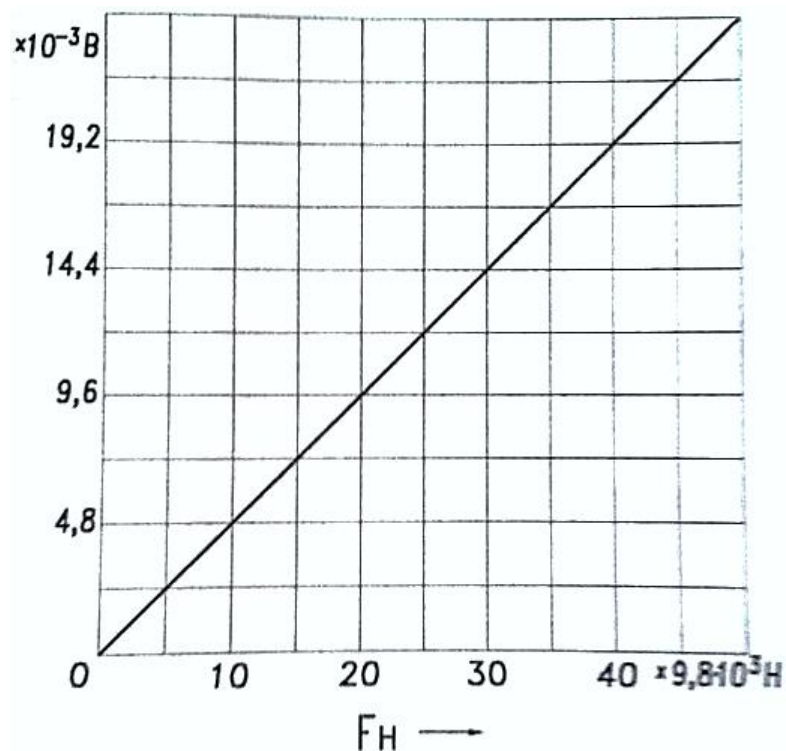


Рисунок 4.5. Графік статичної характеристики

Для подальших розрахунків запишемо рівняння динаміки, відповідно отримаємо наступне:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + cx = F(t), \quad (4.16)$$

де

x - значення переміщення силосприймаючої частини ЧЕ;

m - значення маса силосприймаючої частини ЧЕ;

b - коефіцієнт демпфування коливань;

c - значення жорсткості пружної частини ЧЕ;

F - значення сили збурення;

$m \frac{d^2 x}{dt^2}$ - сила інерції;

$b \frac{dx}{dt}$ - сила демпфування;

cx - сила пружності.

Отримане рівняння необхідно записати в операторному вигляді, відповідно отримаємо наступний запис:

$$mp^2x(p) + bpx(p) + cx(p) = F(p)$$

На основі виразу в операторній формі визначимо передаточну функцію:

$$W(p) = \frac{X(p)}{F(p)} = \frac{1}{mp^2 + bp + c}$$

При $p = j\omega$ передаточну функцію можна визначити наступним чином:

$$W(j\omega) = \frac{1}{-m\omega_b^2 + jb\omega_b + c}$$

де, ω_b - значення частоти вимушених коливань.

Модуль передаточної функції може бути визначений так:

$$|W(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{(1 - m\omega_b^2) + b^2\omega_b^2}}$$

Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) у свою чергу розраховується наступним чином:

$$A(\omega) = \frac{|W(\omega)|}{|W(0)|} = \frac{1}{\frac{1}{c} \sqrt{(c - m\omega_b^2)^2 + b^2\omega_b^2}}$$

У результаті виконаних перетворень отримано наступний вигляд виразу:

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{(1 - \frac{m\omega_b^2}{c})^2 + \frac{b^2\omega_b^2}{c^2}}}$$

Для розрахунку також варто враховувати:

					ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\frac{c}{m} = \omega_0^2$$

$$\frac{b}{m} = 2\omega_0\xi$$

відповідно де:

ω_0 – значення частоти коливань рухомої частини ЧЕ, тобто власна частота коливань;

ξ - коефіцієнт затухання коливань, у даному випадку показник $\xi = 0,1$.

Запишемо вирази АЧХ наступним чином:

$$\frac{b^2 \omega_b^2}{c^2} = \frac{4\xi \omega_0^2 m^2 \omega_b^2}{c^2} = \frac{4\xi^2 \omega_b^2 \omega_0^2}{\omega_0^4} = \frac{4\xi^2 \omega_b^2}{\omega_0^2} = 4\xi^2 \gamma^2$$

де: $\omega_b / \omega_0 = \gamma$ - описує відношення частот.

Наступним кроком визначимо вираз для розрахунку АЧХ. Відповідно отримає наступне:

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{(1 - \frac{\omega_b^2}{\omega_0^2})^2 + 4\xi^2 \frac{\omega_b^2}{\omega_0^2}}} = \frac{1}{\sqrt{(1 - \gamma^2)^2 + 4\gamma^2 \xi^2}}$$

На рисунку нижче показано отриманий графік амплітудно-частотної характеристики (див. рис. 4.6).

					ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

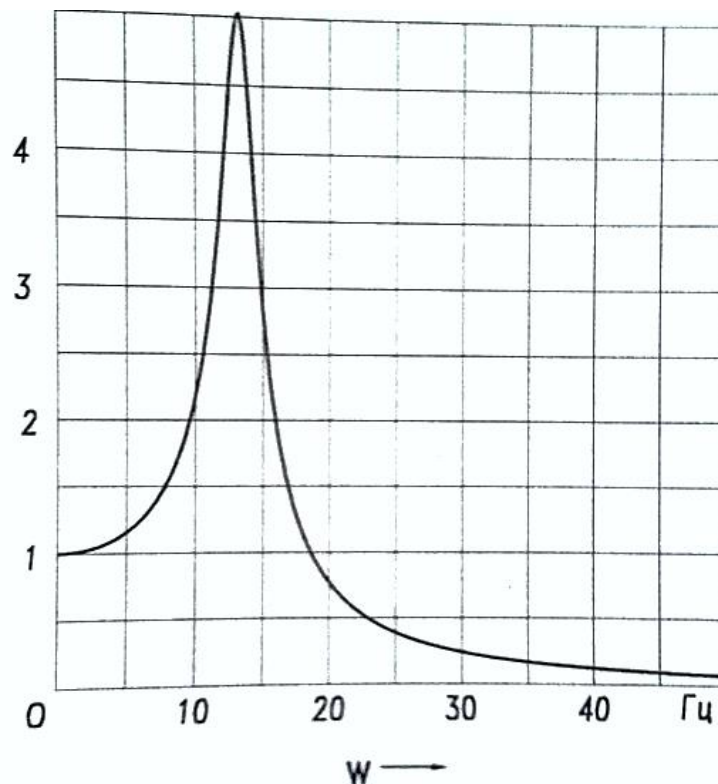


Рисунок 4.6. Графік амплітудно-частотної характеристики (АЧХ)

Для розрахунку частоти власних коливань використовується наступний вираз:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{48EI}{(m + m + 1,6m\delta)c_{13}}}$$

відповідно де,

m - маса силосприймаючої частини ЧЕ;

m_6 - маса балки ЧЕ;

M - маса еквівалентна сприймаючому ЧЕ номінальному зусиллю,
 $M=50000\text{кг}$;

m_6, m – значення, якими можна знехтувати;

I – момент інерції балки прямокутного перерізу.

Для розрахунку значення моменту інерції необхідно використовувати наступну формулу:

$$I = \frac{bh^3}{12}$$

де:

l_1 - довжина балки до центра ЧЕ, у даному випадку становить $l_1 = 54\text{мм}$.

Відповідно:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{48Ebh^3}{12(m + m + 1,6m\delta)c_{13}}}$$

Зокрема, фазочастотна характеристика визначається згідно наступного виразу:

$$\varphi(\omega) = -\arctg \frac{b\omega^6}{c - m\omega_b} = -\arctg \frac{2\xi\omega_0\omega_b}{\omega_0^2\omega_b^2}$$

Отриманий графік фазочастотної характеристики (ФЧХ) зображено нижче на рис. 4.7.

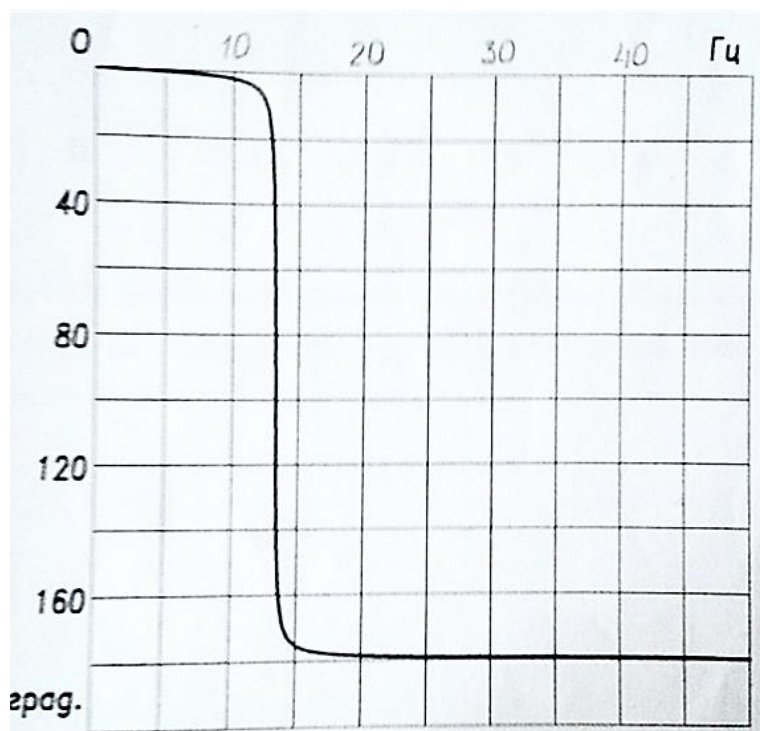


Рисунок 4.7. Графік фазочастотної характеристики (ФЧХ)

Перехідна характеристика, у свою чергу, визначається наступним чином:

$$h(t) = 1 - e^{-2\pi\omega_0\xi t} \frac{1}{\sqrt{1 - \xi^2}} \cos(2\pi\omega_0\sqrt{1 - \xi^2}t + \arctg \frac{\xi}{\sqrt{1 - \xi^2}})$$

Отриманий графік перехідної характеристики зображений на рис. 4.8.

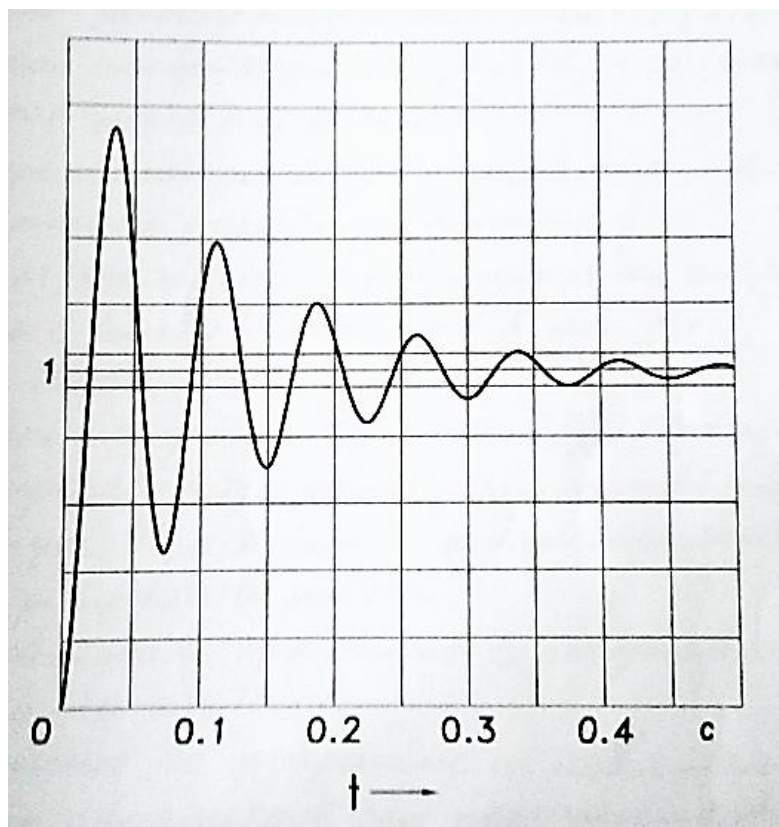


Рисунок 4.8. Графік перехідної характеристики

Точність датчика - це показник, який характеризує здатність датчика виконувати вимірювання та отримувати значення яке наближене до істинного значення вимірювальної величини. Основною характеристикою точності є основна похибка.

Точність включає у собі декілька складових, а саме:

- 1) показник нелінійності - відображає відхилення характеристики датчика від ідеального значення;
- 2) гістерезис - різниця в показаннях при підході до одного і того ж самого значення навантаження;
- 3) повторюваність - відображає здатність отримувати однакові результати вимірювань при забезпеченні однакових умов;

4) похибка повзучості - зміна показань при незмінному навантаженні протягом певного часу;

5) чутливість до температурних змін – відображає як температура впливає на забезпечення заданої точності.

Основна похибка визначається як геометрична сума складових:

$$\delta = \sqrt{\psi^2 + \sigma^2 + \gamma^2 + \beta^2 + \alpha^2 + \gamma_{\varepsilon}^2}, \quad (4.9)$$

де:

ψ - значення системної складової похибки;

σ - середнє квадратичне відхилення випадкової складової похибки;

γ_{ε} - гістерезис;

γ - значення нелінійності;

β - показник зміни НКП при зміні температури на 10°C;

α - показник зміни РКП при зміні температури на 10°C.

Для розрахунку даних похибок використовуються дані з довідників, у яких ці значення записані після визначення експериментальним шляхом.

Виконаємо порівняння згідно на основі даних раніше розглянутих датчиків та їх показників (див. табл. 4.1)

Таблиця 4.1. Складові похибки датчиків

	1	2	3
ψ	0,02	0,05	0,1
σ	0,01	0,01	0,01
γ_z	0,02	0,05	0,01
γ	0,02	0,05	0,017
β	0,02	0,02	0,02
α	0,05	0,05	0,05

На основі цих табличних даних та виразу для розрахунку можемо визначити показники похибок для порівняння. Відповідно отримаємо наступне:

					ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\delta 1 = \sqrt{\psi^2 + \sigma^2 + \gamma^2 + \beta^2 + \alpha^2 + \gamma_e^2} = \sqrt{0,02^2 + 0,01^2 + 0,02^2 + 0,02^2 + 0,02^2 + 0,05^2} = 0,2\%$$

$$\delta 2 = \sqrt{\psi^2 + \sigma^2 + \gamma^2 + \beta^2 + \alpha^2 + \gamma_e^2} = \sqrt{0,05^2 + 0,01^2 + 0,05^2 + 0,05^2 + 0,02^2 + 0,05^2} = 0,15\%$$

$$\delta 3 = \sqrt{\psi^2 + \sigma^2 + \gamma^2 + \beta^2 + \alpha^2 + \gamma_e^2} = \sqrt{0,1^2 + 0,01^2 + 0,01^2 + 0,017^2 + 0,02^2 + 0,05^2} = 0,12\%$$

Варто зазначити, що у деяких випадках похибка датчика може бути знижено за рахунок певної її складової. Один із ефективних методів мінімізації похибки є виконання тарування при однакових умовах з експлуатаційними.

4.2. Сутність процесу моделювання роботи автоматизованої системи

Моделювання та симуляція роботи систем та процесів є важливим елементом процесу проєктування та оцінки роботи пристроїв і систем. За допомогою моделювання можна створити цифровий варіант системи та оцінити її працездатність.

Моделювання є найбільш ефективним методом дослідження складних систем різного призначення: технічних, економічних, екологічних, соціальних, інформаційних. Моделювання є доцільним на різних етапах розробки, як на етапі проєктування, так і в процесі експлуатації [13].

У свою чергу **модель** [15] представляє собою природний або штучний об'єкт, який має певну відповідність до іншого реального об'єкта, поведінка якого потрібно дослідити, описати, або реалізувати згідно з тим, які властивості чи поведінку досліджувана система чи об'єкт повинна забезпечувати.

Наступним етапом розглянемо процес моделювання (див. рис. 4.9).

					<i>ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ</i>	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

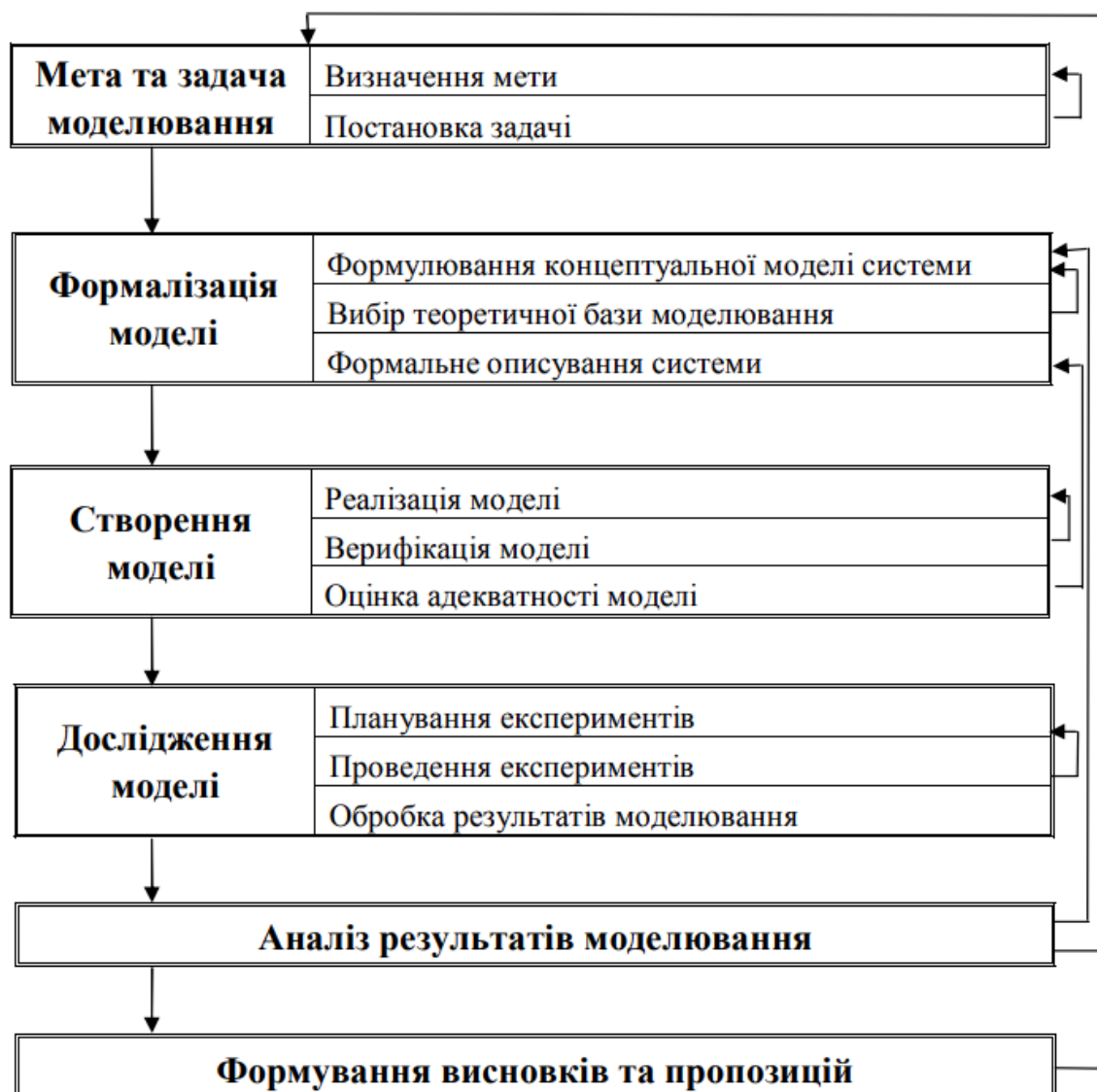


Рисунок 4.9. Процес моделювання [13]

Моделювання виконується за допомогою різноманітних підходів, але у контексті розробки фізичних систем, зокрема АСВДЗ, особливої актуальності набуває побудова імітаційних моделей, які призначені для симуляції поведінки досліджуваної системи з подальшою аналізом отриманих показників.

Імітаційні моделі описують об'єкт дослідження, при цьому імітуючи елементарні явища, з яких складається функціонування системи, зі збереженням їхньої логічної структури, послідовності виконання процесів у часі, особливостей і складу інформації про стан процесу. Зазначимо про наявність

аналогії між дослідженням процесів методом імітаційного моделювання та їхнім експериментальним дослідженням [14].

Моделювання може виконуватися різноманітними методами, зокрема із застосуванням спеціалізованого ПЗ та мови програмування. Для виконання поточної задачі моделювання роботи АСВДЗ буде використано мову програмування Python та онлайн середовище Goggle Colab.

Мова Python була обрана з огляду на доступність, велику кількість бібліотек для візуалізації, які також використовуються у середовищі моделювання MatLab, а також зрозумілості.

Сам процес моделювання складається з кількох етапів [13]:

- 1) визначення мети та задачі моделювання;
- 2) виконання вербального опису системи, що включає у собі опис змінних моделі, опис структури та концептуальної моделі системи. Виходячи з концептуальної моделі системи та з огляду на вибір інструментальних засобів, виконується вибір теоретичної бази, на основі якої буде побудована модель системи;
- 3) процес створення моделі, де виконується реалізація моделі за допомогою обраного програмного забезпечення;
- 4) дослідження моделі та аналіз результатів моделювання. Виконуючи аналіз результатів можна отримати корисну інформацію щодо функціональності системи, особливостей її роботи та які показник вона здатна забезпечити.

4.3. Розробка та опис програмної моделі АСВДЗ

Моделювання роботи АСВДЗ буде включати наступну послідовність етапів:

- 1) початкове налаштування вхідних параметрів та умов;
- 2) створення змінних для збереження результатів у процесі моделювання;

					<i>ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ</i>	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3) виконання самого процесу симуляції, яке буде включати спорожнення бункера з зерном, наповнення ємності для вимірювання, імітацію роботи тензодатчика та спорожнення ємності після виконання кожного вагового дозування;

4) візуалізація результатів роботи автоматизованої системи;

5) аналіз отриманих графіків та результатів.

Моделювання повинно виконуватися таким чином, щоб врахувати усі можливі фактори, які необхідні для оцінки роботи системи, та уникати врахування показників, які будуть зайвими і перевантажувати процес симуляції роботи.

На початку програми моделювання виконується імпорт необхідних бібліотек для забезпечення основних цілей процесу симуляції та візуалізації, а також задання вхідних параметрів та показників (див. рис. 4.10).

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# --- ВХІДНІ ПАРАМЕТРИ ---
num_iterations = 20          # Кількість порцій
target_weight = 5.0          # Цільова вага (кг)
tolerance_percent = 1.5      # Допустима похибка ±%
fill_step = 0.2              # Розмір однієї дози (в кг)
noise_std = 0.015            # Стандартне відхилення шуму тензодатчика
initial_hopper_mass = 150.0  # Початковий об'єм матеріалу у бункері
```

Рисунок 4.10. Фрагмент коду з імпортом бібліотек та заданням вхідних параметрів

Для задачі обрано бібліотеки numpy для роботи з масивами, та matplotlib для побудови графіків параметрів які отримані у результатів процесу моделювання.

Також задаються вхідні параметри, зокрема такі як: початковий об'єм бункеру з матеріалом, кількість порцій для насипання та їх розмір, значення

					ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

цільової ваги, допустима похибка системи для того щоб забезпечити коректну роботу, а також враховується відхилення тензодатчика у зв'язку з шумом

Наступним кроком є розрахунок допустимих меж відхилення, а також ініціалізація змінних та масивів для збереження результатів (див. рис. 4.11).

надається за запитом до авторів

Рисунок 4.11. Фрагмент коду з початковими налаштуваннями

Дана фрагмент відображає усі змінні та масиви для збереження результатів. Масиви є важливим елементом системи моделювання, так як добре підходять для збереження послідовності значень, а також з ними легко маніпулювати та відображати. У даному випадку використовуються одновимірні масиви, так як всі значення вимірювання можна представити у вигляді списку послідовності, але не мають визначеної довжини, так як вона визначається кількістю ітерацій.

Наступним відбувається процес моделювання з симуляцією насипання, спорожнення бункера, процесом вимірювання (див. рис. 4.12).

надається за запитом до авторів

Рисунок 4.12. Фрагмент коду з процесом моделювання

Процес моделювання розпочинається з задання локальної змінної маси згідно початкових налаштування, а також ініціалізації циклу для виконання визначеної кількості ітерацій. Ітерації відображають кількість етапів дозування

					<i>ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ</i>	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

матеріалу, у даному випадку виконується моделювання 20-ти етапів. Це необхідно для того, щоб забезпечити коректний процес пересипання сипучого матеріалу (у контексті задачі - зерна).

У циклі задаються локальні змінні для збереження поточної ітерації та поточної ваги у дозаторі, у даному випадку вони оновлені до нуля і будуть скидатися до 0 після кожного завершеного етапу зважування.

В основному циклі додано вкладений цикл для симуляції процесу пересипання, вимірювання та збереження проміжних результатів. Цей цикл виконується в межах кожної ітерації основного циклу.

Моделювання представлено виконанням процесу пересипання матеріалів, зокрема враховується фактор закінчення матеріалів в основному бункері, що є симуляцією датчика рівня.

Наступним етапом відбувається симуляція вимірювання тензодатчика з врахування випадкового фактору шуму. Після виконується логування - процес запису змін і весь цей процес повторюється до тих пір, доки не буде досягнуто мети системи, а саме отримання показника на тензодатчику заданої ваги дозування з врахування допустимої похибки, після чого перший цикл моделювання процесу насипання та вимірювання завершується.

Цей процес повторюється до тих пір, доки не буде досягнути заданої мети моделювання, у даному випадку виконання усіх заданих ітерацій.

Також на кожному етапі моделювання виконується запис отриманих результатів моделювання у масиви для подальшого виведення та візуалізації на графіках процесу. Такий підхід дозволяє оцінити якість моделювання та потенційні можливості системи.

Наступний етап це виведення таблиці результатів моделювання після завершення виконання основного циклу програми (див. рис. 4.13).

					<i>ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ</i>	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```
# --- ВИВЕДЕННЯ ТАБЛИЦІ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ ---
print("\n 📊 Результати дозування:")
print("-" * 55)
for row in results_table:
    print(f"Ітерація {row['Ітерація']:>2}: "
          f"Кроків = {row['Кроків дозування']:>2}, "
          f"Виміряна маса = {row['Виміряна маса']:>5} кг")
print(f"\n 🕒 Загальний час моделювання (кроків): {global_step}")
print(f"📦 Залишок у бункері: {round(hopper_mass, 2)} кг")
```

Рисунок 4.13. Фрагмент коду з виведенням таблиці збережених результатів

Виведення результатів реалізовано також з використанням циклу, який виводить усі показники по таким значенням як: ітерація; кількість кроків дозування; показник моделювання процесу вимірювання тензодатчиком.

Також до загальної інформації виводиться показник загального часу моделювання та залишок матеріалів у бункері.

Наступними кроками виконується виведення графіків, які є основною ціллю виконання моделювання роботи системи.

Спочатку виконується побудова графіку процесу дозування матеріалів у ємність для вимірювання (див. рис. 4.14)

надається за запитом до авторів

Рисунок 4.14. Фрагмент коду візуалізації процесу дозування

На графіку передбачено відображення реальної маси в дозаторів, вимірюного показника за допомогою тензодатчика, початок порції, а також розраховані допустимі межі що відображають відхилення від необхідного значення. Моделювання виконується у певних умовних одиницях часу, одиниця вимірювання маси – кг.

Наступним графіком за необхідністю є показник вимірної ваги кожної порції процесу дозування (див. рис. 4.15).

```
# 2. Виміряна вага кожної порції
plt.figure(figsize=(10, 5))
plt.plot(range(1, len(measured_doses) + 1), measured_doses, marker='o', label="Виміряна вага", color='tab:orange')
plt.hlines([min_weight, max_weight], 1, len(measured_doses), colors='green', linestyle='dashed', label='Допустимі межі')
plt.axhline(y=target_weight, color='black', linestyle='-', label='Цільова вага')

plt.xlabel("Ітерація")
plt.ylabel("Вага (кг)")
plt.title("Виміряна вага кожної порції")
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.tight_layout()
plt.show()
```

Рисунок 4.15. Фрагмент коду візуалізації вимірювання

Даний графік відображає записані під час моделювання результати вимірювання на кожній ітерації і відображається у порівнянні з цільовим показником враховуючи допустимі межі відхилень.

Наступним графіком є відображення зміни рівня матеріалів у бункері (див. рис. 4.16).

надається за запитом до авторів

Рисунок 4.16. Фрагмент коду візуалізації зміни рівня матеріалів у бункері

Даний графік відображає поступове зменшення матеріалів, що є важливим показником для оцінки роботи системи, а також моделює реальний процес аналізу поточних залишків у ємності.

Останні графіком у процесі моделювання є відображення похибки дозування (див. рис. 4.17).

					ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```
# 4. Графік похибки дозування
errors = [measured - target_weight for measured in measured_doses]
plt.figure(figsize=(10, 5))
plt.plot(range(1, len(errors) + 1), errors, marker='o', color='purple', label='Похибка дозування')
plt.axhline(0, color='black', linestyle='--')
plt.xlabel("Ітерація")
plt.ylabel("Похибка (кг)")
plt.title("Відхилення кожної порції від цільової маси")
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.tight_layout()
plt.show()
```

Рисунок 4.17. Фрагмент коду візуалізації похибки дозування

Даний графік є важливим показником для оцінки точності роботи автоматизованої системи вагового дозування, так як відображає наскільки системі вдається забезпечити оптимальну (задану) точність дозування.

Розроблений алгоритм моделювання охоплює усі важливі аспекти процесу вагового дозування та відображає основні показники для подальшої оцінки працездатності, точності дозування та вимірювання, стабільності роботи системи та визначення потенційних шляхів оптимізації тощо.

4.4. Аналіз та оцінювання результатів моделювання. Візуалізація отриманих результатів

Наступним етапом виконується аналіз отриманих результатів та перевірка їх відповідності до заданих умов задачі моделювання. Даний етап є ключовим у процесі виконання моделювання роботи системи, так як правильна інтерпретація результатів має важливий вплив на коректний висновок щодо системи загалом.

Спочатку виконується виведення таблиці з результатами дозування та вимірювання на кожній ітерації (див. рис. 4.18).

					<i>ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ</i>	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

Результати дозування:
-----
Ітерація 1: Кроків = 25, Виміряна маса = 4.976 кг
Ітерація 2: Кроків = 25, Виміряна маса = 4.991 кг
Ітерація 3: Кроків = 25, Виміряна маса = 4.973 кг
Ітерація 4: Кроків = 25, Виміряна маса = 5.004 кг
Ітерація 5: Кроків = 25, Виміряна маса = 4.995 кг
Ітерація 6: Кроків = 25, Виміряна маса = 5.005 кг
Ітерація 7: Кроків = 25, Виміряна маса = 5.005 кг
Ітерація 8: Кроків = 25, Виміряна маса = 5.006 кг
Ітерація 9: Кроків = 25, Виміряна маса = 5.014 кг
Ітерація 10: Кроків = 25, Виміряна маса = 4.973 кг
Ітерація 11: Кроків = 25, Виміряна маса = 5.008 кг
Ітерація 12: Кроків = 25, Виміряна маса = 4.997 кг
Ітерація 13: Кроків = 25, Виміряна маса = 4.997 кг
Ітерація 14: Кроків = 25, Виміряна маса = 4.977 кг
Ітерація 15: Кроків = 25, Виміряна маса = 5.026 кг
Ітерація 16: Кроків = 25, Виміряна маса = 4.997 кг
Ітерація 17: Кроків = 25, Виміряна маса = 5.01 кг
Ітерація 18: Кроків = 25, Виміряна маса = 5.002 кг
Ітерація 19: Кроків = 25, Виміряна маса = 4.989 кг
Ітерація 20: Кроків = 25, Виміряна маса = 5.001 кг

🕒 Загальний час моделювання (кроків): 500
📦 Залишок у бункері: 50.0 кг

```

Рисунок 4.18. Фрагмент коду візуалізації похибки дозування

Основним важливим показником цієї таблиці є виміряний показник отриманої маси в межах конкретної ітерації після виконання усіх етапів дозування.

Заданим значенням цільової ваги є 5 кг, як було вказано раніше на етапі ініціалізації змінних, і показник вимірювання відображає те що отриманий результат роботи системи відповідає поставленим вимогам з врахування меж допустимої похибки.

Першим графіком для відображення та оцінки є візуалізація процесу дозування, що також у свою чергу відображає процес роботи тензодатчика протягом часу роботи системи (див. рис. 4.19).

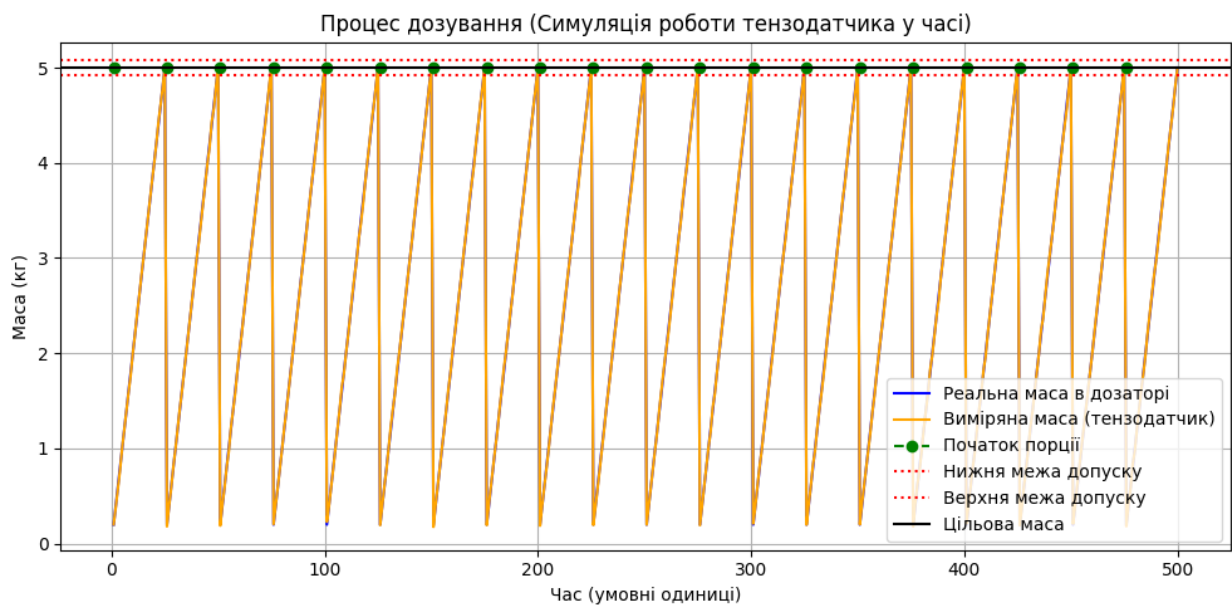


Рисунок 4.19. Графік процесу дозування (Симуляція роботи тензодатчика у часі)

Графік має пилоподібну форму, так як процес дозування (насипання) у ємність для зважування відбувається поступово, відповідно що значення маси буде збільшуватись з часом виконання етапів дозування.

Графік відображає такі показники як реальна маса в дозаторі та виміряна тензодатчиком, але у даному випадку вони майже збігаються. Тому для оцінки відхилення виміряного значення та реального буде використано графік похибки. Також відображає цільову мету кожної ітерації, цільову масу і визначені допустимі межі похибки. Після кожної ітерації виконується висипання матеріалів для подальшого використання, що відображається на графіку стрімким падінням значення маси до 0.

Отриманий графік відображає коректний процес циклічного дозування матеріалу з врахуванням допустимих меж в автоматизованому режимі.

Наступним графіком є процес спорожнення бункера в результаті процесу дозування (див. рис. 20).

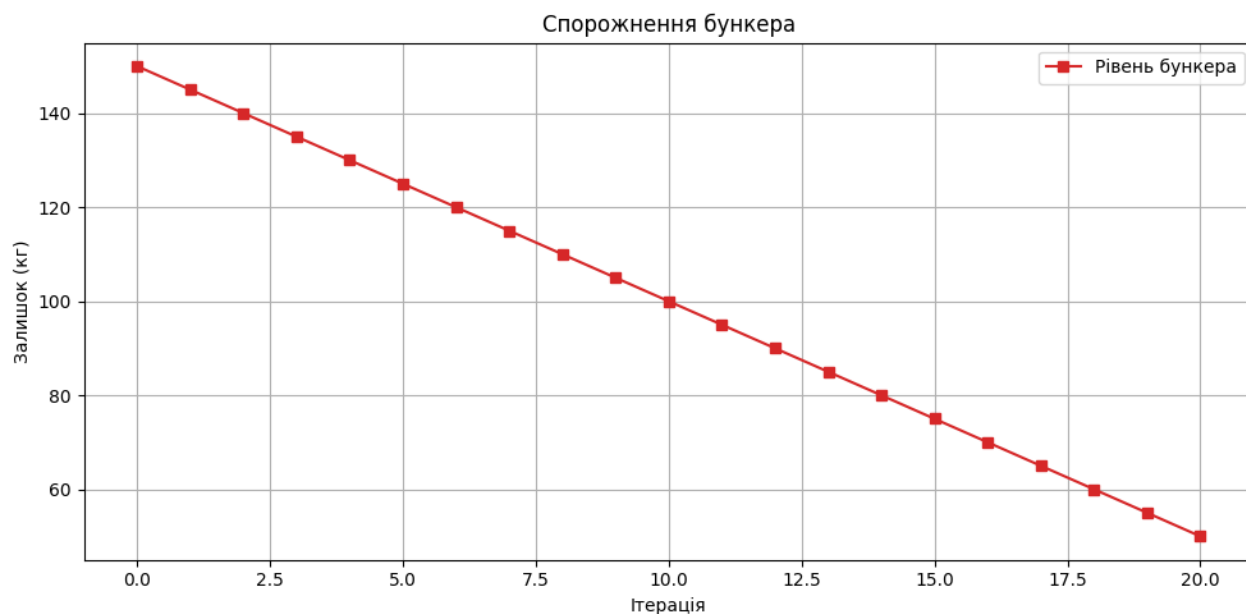


Рисунок 4.20. Графік процесу спорожнення бункера

Даний графік відображає правильну зміну показника кількості маси, а також відображає усі ключові точки поточного рівня на кожній основній ітерації циклу.

Даний графік демонструє коректну симуляцію роботи датчика рівня в ємності що дозволяє оцінити фактичні залишки, а також порівняти зміну кількості матеріалу в бункері та кількість дозованого матеріалу, наприклад для оцінки коректності процесу дозування та точності вимірювання.

У даному випадку, після завершення процесу моделювання у бункері залишилось близько 50 кг матеріалу, у контексті даної задачі – зерна.

Наступним важливим графіком оцінки роботи автоматизованої системи є графік відображення значень вимірюної ваги зерна на кожній ключовій ітерації моделювання.

Отриманий графік моделювання відображено на рис. 4.21.

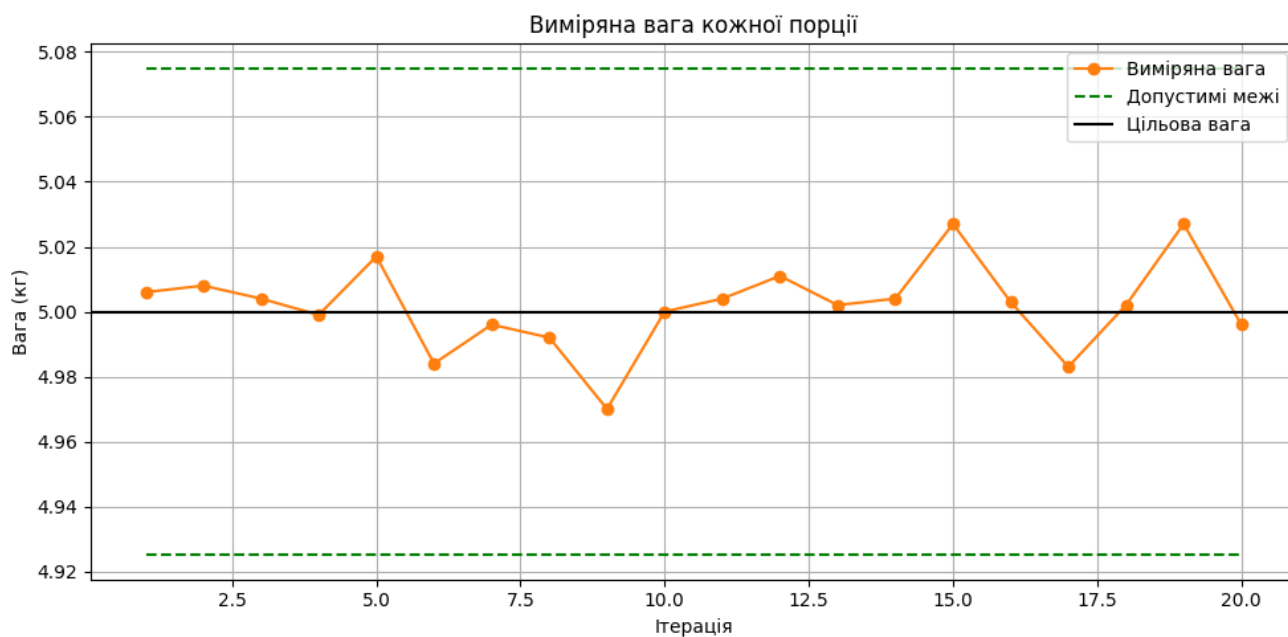


Рисунок 4.21. Графік значень виміряної ваги на кожній ітерації

На графіку зображено фактичні показники симуляції вимірювання тензодатчика у порівнянні з цільовим показником, а також в межах значень допустимих відхилень.

Згідно отриманих результатів можна визначити, що максимальні значення відхилень від цільового показника знаходяться в межах норми, відповідно: приблизно 5,03 кг - верхня межа та 4,97 кг - нижня межа.

Отриманий результат не перевищує оптимальних значень $\pm 1,5\%$, що вказує на правильне функціонування моделі автоматизованої системи вагового дозування зерна.

Але важливо наголосити на тому, що значення похибки може сильно змінюватися після виконання більшої кількості ітерацій вимірювання, а також якщо враховувати інші різноманітні фактори та зовнішні впливи, зокрема поступове зношення обладнання, погіршення роботи тензодатчика, вплив нагріву в результаті роботи виконавчих механізмів тощо.

Останнім графіком, який отримано в результаті моделювання є відображення відхилень значень дозування на кожній ітерації відносно цільового значення (див. рис. 4.22).

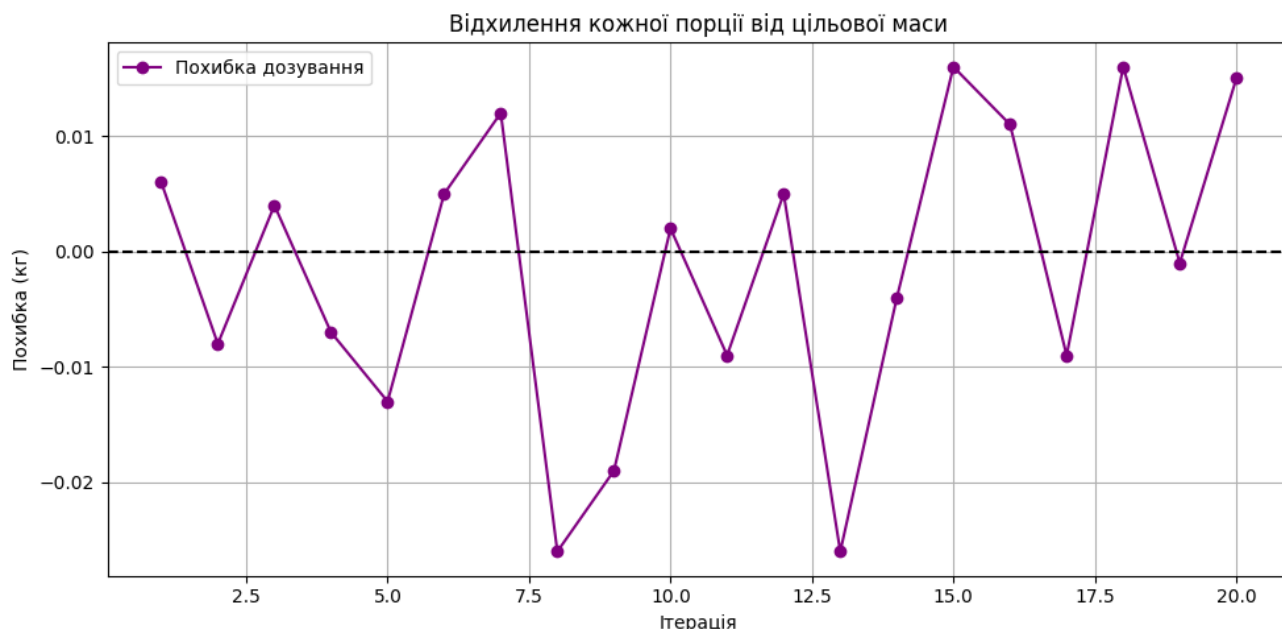


Рисунок 4.22. Графік відхилень кожного ітерації дозування від цільового значення

Даний графік відображає фактичну отриману похибку роботи системи, відповідно чим ближче показник до нульової лінії – тим система точніше. Але в реальних умовах система ніколи не зможе досягнути точного значення згідно ідеального цільового показника, тому для оцінки точності використовують межі допустимих значень і зазвичай вони визначаються у формі відсотку від цільового значення у верхній та нижніх межах.

Отримані значення на графіку відхилень від цільового значення знаходяться у межах допустимого, що є наближеним результатом до реальної роботи системи.

4.5. Висновки до розділу 4

У цьому розділі було проведено розробку моделі та виконано процес програмного моделювання роботи автоматизованої системи вагового дозування зерна. Для виконання цілі моделювання було використано мову програмування Python та відповідний набір бібліотек.

Розроблена модель виконує такі процеси як: подача зерна з бункера, процес накопичення у ємності вимірювача, симуляцію процесу вимірювання та відображення показників тензодатчика з врахування впливу зовнішніх факторів, а також симуляцію роботи датчика рівня для відображення спорожнення ємності після кожного циклу дозування.

При розробці моделі було враховано реальні технічні параметри, такі як допустима похибка, об'єм бункера з зерном, цільова маса порції, ітерації дозування та інші.

Отримані результати були сформовані у вигляді таблиці та графіків, що дозволило виконати оцінку результатів моделювання. Графіки у свою чергу відображають зміну ваги під час кожного повторення циклу дозування, зміну рівня матеріалів у бункері, точність вимірювання та похибку дозування на кожній ітерації.

Аналіз отриманих результатів показав, що розроблена модель дозволяє ефективно оцінити працездатність автоматизованої системи, виявити потенційні проблеми наприклад невідповідність заданим межах допустимих значень. Отримані результати демонструють що система АСВДЗ здатна працювати згідно заданих параметрів.

Таким чином засоби моделювання є корисним інструментом для оцінки точності та надійності системи, а також попереднього розрахунку параметрів її роботи.

					<i>ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ</i>	Арк.
						77
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У межах даної роботи було виконано огляд та аналіз системи для реалізації функції вагового дозування зерна. Розглянуто особливості автоматизованих систем та принцип їх роботи.

Розробка та подальше використання автоматизованих систем вагового дозування зерна дозволить забезпечити високу точність виробництва та дотримання стандартів якості вихідної продукції.

У процесі виконання роботи було розглянуто послідовність наступних питань та аспектів:

- розглянуто засоби та технології автоматизації технологічних процесів, з акцентом на застосування у сфері аграрної промисловості. Виконано загальний аналіз рішень цифровізації процесів у контексті аграрного комплексу. Визначено перелік переваг цифровізації та автоматизації, а також сформовано перелік обмежень та потенційних перешкод;

- розглянуто сутність процесу дозування, а також способи виконання цієї задачі. Виконано огляд дозування об'ємними та ваговими методами, у результаті чого було визначено, що найточнішим є метод вагового дозування. Побудовано та описано структурну та функціональну схему автоматизованої системи вагового дозування зерна;

- виконано огляд аспектів розробки програмного забезпечення для автоматизованих систем. Розроблено алгоритм та описано послідовність логіки виконання операцій АСВДЗ, на основі чого було побудовано блок-схему алгоритму;

- побудовано модель АСВДЗ, яка призначена для виконання імітації базового функціоналу та аналізу ключових показників. У результаті роботи моделі було отримано графіки роботи, а саме: графік імітації роботи тензодатчика; імітації роботи датчика рівня для фіксації спорожнення бункера з зерном; графік точності дозування; графік похибки системи.

					<i>ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ</i>	Арк.
						78
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ ТА ДЖЕРЕЛ

1. Технічні засоби автоматизації: навч. посіб.: у 2 ч. Ч. 1. Сенсорна техніка / В.В. Ткачов, М.І. Стаднік, В.І. Шевченко, М.В. Козарь, О.В. Карпенко ; М-во освіти і науки України, НТУ «Дніпровська політехніка». – 2-ге вид., доповн. та переробл. – Дніпро : НТУ «ДП», 2019. – 144 с;

2. Трегуб В.Г. Проектування систем автоматизації: Навч. посібник. – К.: Видавництво Ліра-К, 2017. – 344 с.;

3. Я.І. Проць, О.А. Данилюк, Т.Б. Лобур. Автоматизація неперервних технологічних процесів. Навчальний посібник для технічних спеціальностей вищих навчальних закладів. – Тернопіль: ТДТУ ім. І.Пулюя, 2008. – 239с.;

4. Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні: Конспект лекцій для студентів спеціальностей «Технологія машинобудування» 7.05050201, 8.05050201 денної та заочної форми навчання / Сост.: В. Т. Саункін, С. Л. Міранцов, В. І. Тулупов. – Краматорськ: ДГМА, 2012. – 100 с.;

5. Самойленко , Д. (2024). Особливості застосування цифрових технологій а агробізнесі. Економіка та суспільство, (64). 9 с. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-64-148>;

6. Юрчук Н. П., Кіпоренко С. С. Особливості використання цифрових технологій в агробізнесі. Східна Європа: економіка, бізнес та управління. 2022. № 3 (36). С. 109–116. DOI: <https://doi.org/10.32782/easterneurope.36-17>;

7. Шалева, В. В. Аналіз функційних можливостей автоматизованих систем дозування готових лікарських засобів / Шалева В. В., Матіко Ф. Д. // Вісник КПП. Серія Приладобудування : збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 68(2). – С. 65-73. – Бібліогр.: 15 назв.;

8. Ваговий дозатор або об'ємний. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://asvik.kiev.ua/ua/articles/21> (дата звернення 15.05.25);

9. Тодавич В. І. Чинники, що впливають на якість дозування / В. І. Тодавич; наук. кер. Р. В. Зінько // Наукові розробки молоді на сучасному етапі

					<i>ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		79

: тези доповідей XVII Всеукраїнської наукової конференції молодих вчених та студентів (26-27 квітня 2018 р., Київ). - Київ : КНУТД, 2018. - Т. 2 : Мехатронні системи і комп'ютерні технології. Ресурсозбереження та охорона навколишнього середовища. - С. 447-448.;

10. Цибульник, С. О. Технології розроблення програмного забезпечення. Частина 1. Життєвий цикл програмного забезпечення. Підручник [Електронний ресурс] : підручник для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Цибульник С. О., Барандич К. С. – Електронні текстові дані (1 файл: 3,43 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 270 с. – Назва з екрана.;

11. Петрик М.Р. Моделювання програмного забезпечення : науково-методичний посібник / М.Р. Петрик, О.Ю. Петрик – Тернопіль : Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2015. – 200 с.;

12. Коновалов В.С., Радоуцький К.Є. Сучасні принципи і методи проектування програмного забезпечення: Конспект лекцій. – Харків: УкрДАЗТ, 2015. – Ч. 2. – 109 с.;

13. Стеценко, І.В. Моделювання систем: навч. посіб. [Електронний ресурс, текст] / І.В. Стеценко ; М-во освіти і науки України, Черкас. держ. технол. ун-т. – Черкаси : ЧДТУ, 2010. – 399 с.;

14. Імітаційне моделювання систем масового обслуговування: Практикум. – Львів: Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2007. – 307 с.;

15. MATLAB і моделювання динамічних систем. Навчальний посібник. Глава 5. Моделювання динамічних систем. – Київ: НТУУ "КПІ", 2009. – 65 с.;

16. Проектування систем автоматизації [Текст]: навч. посібник / М.С. Пушкар, С.М. Проценко – Д.: Національний гірничий університет, 2013. – 268 с.

17. Слепужніков, Є., Варченко, І., & Фідровська, Н. (2020). Проведення експериментальних досліджень методом тензометрії. Матеріали конференцій МЦНД, 85-86. <https://doi.org/10.36074/01.05.2020.v2.10>;

					<i>ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		80

18. Чапаєв, Д. М. Розробка тензометричного перетворювача із термокомпенсацією / Д. М. Чапаєв, М. Д. Гераїмчук // XIV Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні», 4-5 грудня 2018 року, КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна : збірник праць конференції / КПІ ім. Ігоря Сікорського, ПБФ, ФММ. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – С. 371–373. – Бібліогр.: 3 назви;

19. Мікроконтролери: Архітектура, програмування та застосування в електромеханіці : навч. посіб. / Ю. С. Грищук. – Харків : НТУ «ХП», 2019. – 384с.

20. Kyowa Electronic Instruments Co., Ltd. Transducers – Instruction Manuals [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://product.kyowa-ei.com/en/downloads/manuals/transducers>, вільний. – Назва з екрану;

21. Hottinger Brüel & Kjær (HBK). U93A Miniature Force Transducer – Technical Data Sheet [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.hbm.com/en/10994/u93a-miniature-force-transducer/>, вільний. – Назва з екрану;

22. Zemic. HM14C Load Cell [Електронний ресурс] // Micro-Tess. – Режим доступу: <https://www.micro-tess.com/product/canister-compression-load-cell-hm14c/>, вільний. – Назва з екрану.

					<i>ДПБ ПМ11.08.000.00 ПЗ</i>	Арк.
						81
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		