

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерно-технологічний
Кафедра механічної та електричної інженерії

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи
на здобуття ступеня вищої освіти магістр
бакалавр, магістр

на тему: «Сервісно-інженерні методи підвищення ефективності
пневмосепараторів зерна через сучасні системи контролю та автоматизації»

Виконав: здобувач вищої освіти за
освітньо-науковою програмою
Сервісна інженерія в
агропромисловому виробництві

назва ОПП

спеціальності 133 Галузеве
машинобудування, 208 Агроінженерія

код та найменування спеціальності

ступеня вищої освіти магістр групи 1
Ярмола Андрій Олександрович

Прізвище та ініціали здобувача вищої освіти

Керівник: Власовець Віталій Михайлович
Прізвище та ініціали керівника

Рецензент: Яхін С. В.
Прізвище та ініціали рецензента

Полтава – 2026 рік

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерно-технологічний
Кафедра механічної та електричної інженерії

Міждисциплінарна освітньо-наукова програма
«Сервісна інженерія в агропромисловому виробництві»

Спеціальності: 133 «Галузеве машинобудування», 208 «Агроінженерія»
Ступінь вищої освіти магістр

ЗАТВЕРДЖУЮ

**Завідувач кафедри механічної
та електричної інженерії,**

канд. техн. наук, доцент,

_____ Станіслав ПОПОВ

16 квітня 2025 р.

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

ЯРМОЛА Андрій

1. Тема роботи: **«Сервісно-інженерні методи підвищення ефективності пневмосепараторів зерна через сучасні системи контролю та автоматизації»**,

керівник роботи **доктор техн. наук, професор ВЛАСОВЕЦЬ Віталій**,
затверджено засіданням кафедри, протокол № _____ від _____ р.

2. Строк подання здобувачем вищої освіти роботи – 05 травня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: *аналіз літературних джерел Полтавської обласної універсальної наукової бібліотеки імені Івана Котляревського; аналіз літературних джерел Національної бібліотеки України імені Володимира Вернадського; сучасний досвід підприємств машинобудування та АПК за тематичним спрямуванням.*

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

Розділ 1. Аналіз існуючих досліджень.

Розділ 2. Теоретичні положення.

Розділ 3. Методика досліджень.

Розділ 4. Результати експериментів.

Розділ 5. Практична реалізація розробок.

5. Перелік ілюстраційного матеріалу: *титульний аркуш; назва теми, мета і задачі дослідження; огляд літературних джерел; методика досліджень (моделі, плани експериментів, перевірка адекватності математичних моделей); результати експериментальних досліджень; висновки.*

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Власне ім'я, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання отримав
Практична реалізація розробок	Володимир ДУДНИК, доцент кафедри механічної та електричної інженерії		
	Петро МАКАРЕНКО, професор кафедри економіки та публічного управління		
	Павло ПИСАРЕНКО, завідувач кафедри екології, збалансованого природокористування та захисту довкілля		

7. Дата видачі завдання 16 квітня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з.п.	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вибір і затвердження теми роботи	До 16.04.25	
2	Складання і затвердження розгорнутого плану та завдання на кваліфікаційну роботу	20.04-26.04.25	
3	Опрацювання літературних джерел		
4	Збір, вивчення і обробка інформації, необхідної для виконання роботи	27.04-31.04.25	
5	Виконання розділів роботи	18.05-31.03.25	
6	Оформлення тексту роботи		
7	Попередній захист роботи на кафедрі	19.04-23.04.26	
8	Доопрацювання роботи з урахуванням зауважень і пропозицій	26.04-04.05.26	
9	Нормалізаційний контроль		
10	Захист кваліфікаційної роботи	20.05-26.05.26	

Здобувач вищої освіти _____ Андрій ЯРМОЛА
(підпис)

Керівник роботи _____ Віталій ВЛАСОВЕЦЬ
(підпис)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 5 розділів, 57 рисунків, 18 таблиць, 52 використаних джерела, 130 сторінок.

Мета роботи – підвищення ефективності роботи пневмосепараторів зерна шляхом впровадження сучасних сервісно-інженерних методів контролю та автоматизації технологічного процесу очищення зернового матеріалу.

Об'єкт дослідження – процес очищення зернового матеріалу у пневмосепараторах в умовах експлуатації.

Предмет дослідження – конструктивні параметри, технологічні режими роботи та системи автоматичного контролю пневмосепаратора, які впливають на якість очищення зерна, втрати повноцінного зерна, енерговитрати та ефективність роботи обладнання.

Практична значущість роботи полягає в обґрунтуванні та розробленні технічних рішень, спрямованих на підвищення ефективності функціонування пневмосепаратора шляхом використання сучасних систем автоматизованого контролю та керування. Запропоновані конструктивні та сервісно-інженерні рішення дозволяють знизити втрати повноцінного зерна у відходи, покращити якість очищення зернового матеріалу, зменшити енергетичні витрати та підвищити надійність роботи обладнання. Розроблені рішення можуть бути використані під час модернізації зерноочисного обладнання підприємств агропромислового комплексу.

У першому розділі виконано аналіз сучасного стану пневмосепараційного обладнання та досліджень у галузі очищення зернового матеріалу. Розглянуто класифікацію пневмосепараторів, особливості їх конструкції та принципи функціонування. Встановлено, що основними факторами, які впливають на ефективність очищення зерна, є швидкість повітряного потоку, продуктивність обладнання, фізико-механічні характеристики зерна та рівень автоматизації системи керування.

У другому розділі наведено теоретичні положення процесу пневматичного очищення зерна та виконано аналіз руху зернових частинок у повітряному потоці. Досліджено вплив аеродинамічних характеристик зернового матеріалу, швидкості

повітряного потоку та параметрів роботи вентиляційної системи на процес сепарації. Обґрунтовано доцільність використання автоматичного регулювання режимів роботи пневмосепаратора.

У третьому розділі розроблено методику проведення експериментальних досліджень. Описано експериментальне обладнання, вимірювальні прилади та методику визначення параметрів технологічного процесу. Наведено програму проведення експериментів та методику статистичної обробки результатів. Для досліджень використовувалися пневмокласифікатор Petkus K-293, шумомір Testo 815, трансд'юсер SOHO T-1, цифровий тахометр Autonics CT6S, вологомір WILE-35 та персональний комп'ютер для реєстрації й обробки результатів.

У четвертому розділі представлено результати експериментальних досліджень та аналіз впливу конструктивних і технологічних параметрів на ефективність процесу очищення зернового матеріалу. Встановлено закономірності зміни параметрів акустичних сигналів залежно від вологості зерна, продуктивності пневмосепаратора та частоти обертання вентилятора. Отримано кореляційні залежності між рівнем звукового тиску, електричними сигналами датчиків та фактичними втратами зерна.

У п'ятому розділі виконано практичну реалізацію розроблених рішень та запропоновано комплекс сервісно-інженерних заходів щодо підвищення ефективності роботи пневмосепаратора. Розроблено систему автоматизованого контролю технологічного процесу, регламент технічного обслуговування обладнання та рекомендації щодо використання систем діагностики і моніторингу параметрів роботи обладнання у режимі реального часу. Проведено оцінку охорони праці, пиловихобезпеки та екологічності виробництва.

Рекомендації щодо використання результатів роботи: результати можуть бути використані при модернізації та проектуванні пневмосепараторів, розробці автоматизованих систем керування зерноочисним обладнанням, а також у навчальному процесі закладів вищої освіти аграрного й технічного профілю.

Сфера застосування результатів роботи – зернопереробні підприємства, елеваторні комплекси, зерноочисні та зерносушильні комплекси, підприємства агропромислового комплексу.

Текст роботи пройшов перевірку на плагіат за допомогою сервісу Strike Plagiarism та є оригінальним – 99 %.

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота магістра присвячена підвищенню ефективності роботи пневмосепараторів зерна шляхом удосконалення систем контролю та автоматизації технологічного процесу очищення зернового матеріалу. У роботі проаналізовано сучасний стан пневмосепараційного обладнання, досліджено вплив технологічних параметрів на процес очищення зерна та розглянуто можливості використання акустичних датчиків і систем автоматичного керування. Запропоновано технічні рішення щодо підвищення якості очищення, зменшення втрат зерна та покращення енергоефективності обладнання.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ПНЕВМОСЕПАРАТОР, ОЧИЩЕННЯ ЗЕРНА, АВТОМАТИЗАЦІЯ, АКУСТИЧНИЙ ДАТЧИК, ПОВІТРЯНИЙ ПОТІК, ВТРАТИ ЗЕРНА, СИСТЕМА КОНТРОЛЮ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, СЕРВІСНА ІНЖЕНЕРІЯ, ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС.

ANNOTATION

The master's qualification work is devoted to improving the efficiency of grain pneumatic separators through the implementation of modern service-engineering methods of monitoring and automation of the grain cleaning process. The study analyzes the current state of pneumatic grain separation equipment and investigates the influence of technological parameters on the grain cleaning process. The possibilities of using acoustic sensors and automated control systems are considered. Technical solutions aimed at improving cleaning quality, reducing grain losses, and increasing energy efficiency are proposed.

KEYWORDS: PNEUMATIC SEPARATOR, GRAIN CLEANING, AUTOMATION, ACOUSTIC SENSOR, AIRFLOW, GRAIN LOSSES, CONTROL SYSTEM, ENERGY EFFICIENCY, SERVICE ENGINEERING, TECHNOLOGICAL PROCESS.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	10
1.1. Призначення та класифікація пневмосепараторів зерна	10
1.2. Конструктивні особливості сучасних пневмосепараторів	12
1.3. Аналіз факторів, що впливають на ефективність сепарації	19
1.4. Сучасні системи контролю та автоматизації	26
1.5. Аналіз сервісно-інженерних підходів	37
Висновки до розділу 1	41
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ	43
2.1. Теоретичні основи пневмосепарації зерна	43
2.2. Математичне моделювання процесу сепарації	47
2.3. Обґрунтування параметрів ефективної роботи	53
2.4 Розробка концепції сервісно-інженерної системи	63
Висновки до розділу 2	68
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ	70
3.1. Програма досліджень	70
3.2. Обладнання та експериментальна установка	70
3.3. Методика проведення експериментів	74
3.4. Методика збору та обробки даних	79
3.5. Критерії оцінки ефективності	83
Висновки до розділу 3	87
РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ	90
4.1. Аналіз отриманих експериментальних даних	90
4.2. Вплив параметрів на ефективність сепарації	104
4.3. Оцінка роботи систем автоматизації	108
4.4. Порівняння з традиційними методами	113
Висновки до розділу 4	115
РОЗДІЛ 5. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБКИ	117
5.1. Розробка конструктивних та сервісних рішень	117
5.2. Система сервісного обслуговування	119
5.3 Охорона праці та безпека	120
5.4 Екологічна експертиза	126
Висновки до розділу 5	129
ВИСНОВОК ТА ПРОПОЗИЦІЇ	131
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	134

ВСТУП

Важливе значення для економіки України має зернопереробна галузь, ефективність функціонування якої значною мірою залежить від рівня технічного оснащення підприємств агропромислового комплексу. В умовах постійного збільшення обсягів виробництва та експорту зернової продукції особливої актуальності набуває забезпечення якісної післязбиральної обробки зерна, зокрема процесів його очищення, сортування та підготовки до зберігання або подальшої переробки.

Одним із найбільш поширених видів обладнання для очищення зерна є пневмосепаратори, принцип роботи яких ґрунтується на розділенні зернового матеріалу за аеродинамічними властивостями. Використання пневмосепараторів дозволяє ефективно видаляти легкі домішки, пил, щупле зерно та інші небажані включення, що позитивно впливає на якість готової продукції та підвищує ефективність роботи зерноочисних комплексів.

Ефективність функціонування пневмосепараторів значною мірою залежить від стабільності технологічного процесу, режимів роботи вентиляційної системи, фізико-механічних властивостей зернового матеріалу, а також рівня технічного контролю та автоматизації обладнання. У процесі експлуатації пневмосепараторів часто виникають коливання продуктивності, зміни вологості та засміченості зерна, що призводить до нестабільності процесу сепарації, збільшення втрат повноцінного зерна у відходи та зниження якості очищення.

Аналіз сучасного стану технічного забезпечення зерноочисних комплексів показує, що значна частина пневмосепараторів працює без сучасних систем автоматичного контролю параметрів технологічного процесу. Недостатній рівень автоматизації, відсутність оперативного контролю втрат зерна та нестабільність режимів роботи вентиляційних систем призводять до підвищення енерговитрат, погіршення якості очищення зерна та зростання витрат на технічне обслуговування обладнання.

У зв'язку з цим актуальним є впровадження сервісно-інженерних методів підвищення ефективності роботи пневмосепараторів зерна шляхом використання сучасних систем контролю, автоматичного регулювання та моніторингу технологічних параметрів. Особливого значення набуває розробка і застосування систем поточного контролю втрат зерна, автоматичного керування режимами роботи вентилятора, контролю продуктивності та вологості зернового матеріалу, що дозволяє забезпечити стабільність технологічного процесу та підвищити ефективність роботи обладнання.

Сучасні підходи до автоматизації зерноочисного обладнання базуються на використанні мікроконтролерних систем керування, акустичних і тензометричних датчиків, частотних перетворювачів та цифрових засобів обробки інформації. Їх впровадження дозволяє підвищити точність контролю технологічних параметрів, зменшити втрати повноцінного зерна, забезпечити енергоефективність роботи обладнання та знизити вплив людського фактора на процес очищення.

Зростання вимог до якості зернової продукції, необхідність підвищення енергоефективності та надійності технологічного обладнання обумовлюють необхідність проведення досліджень, спрямованих на вдосконалення систем контролю та автоматизації пневмосепараторів зерна. Це визначає актуальність даної магістерської роботи та її практичну значущість для підприємств агропромислового комплексу.

Мета дослідження – підвищення ефективності роботи пневмосепараторів зерна шляхом впровадження сервісно-інженерних методів контролю та автоматизації технологічного процесу очищення зернового матеріалу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз існуючих конструкцій пневмосепараторів зерна та сучасних систем контролю технологічного процесу.
- дослідити вплив режимів роботи пневмосепаратора на втрати зерна та повноту виділення домішок.
- проаналізувати можливості використання акустичних і тензометричних датчиків для контролю параметрів роботи пневмосепаратора.

- обґрунтувати напрями автоматизації технологічного процесу очищення зерна.

- розробити удосконалені сервісно-інженерні рішення для підвищення ефективності роботи пневмосепаратора.

- виконати аналіз роботи системи автоматичного керування технологічним процесом.

- оцінити вплив запропонованих рішень на стабільність технологічного процесу, втрати зерна та енергоефективність роботи обладнання.

- визначити техніко-економічну ефективність впровадження систем контролю та автоматизації пневмосепаратора.

Об'єкт дослідження – технологічний процес очищення зернового матеріалу в пневмосепараторах.

Предмет дослідження – сервісно-інженерні методи підвищення ефективності роботи пневмосепараторів зерна, а також системи контролю та автоматизації технологічного процесу очищення зерна.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Призначення та класифікація пневмосепараторів зерна

У процесі вирощування зернових культур вагоме значення має післязбиральна обробка, на яку припадає до 40–50% сукупних витрат на виробництво зерна [4, 5, 6]. Зазначена обробка забезпечує очищення зернової маси від сторонніх домішок та зменшення її вологості до рівнів, що відповідають агротехнічним вимогам, що, у свою чергу, запобігає небажаному самозігріванню зерна під час зберігання, а також дозволяє отримати матеріал, придатний для насінневих, продовольчих та інших потреб. Для видалення домішок застосовують зерноочисні машини (ЗОМ). Такі машини можуть мати як декілька функціональних вузлів (комбіновані машини), так і складатися лише з одного (автономні машини).

Пневмосепаратори зерна є важливою складовою технологічного обладнання для післязбиральної обробки зернових культур. Їх основне призначення полягає у розділенні зернового матеріалу за аеродинамічними властивостями під дією повітряного потоку. У процесі роботи пневмосепаратора із зернової маси видаляються легкі домішки, пил, солома, щуплі зернівки, частинки соломи та інші сторонні включення, що дозволяє підвищити якість зерна, знизити його засміченість і підготувати матеріал до подальшого зберігання або переробки.

Використання пневмосепараторів у технологічних лініях зерноочисних комплексів забезпечує покращення посівних, продовольчих і фуражних характеристик зерна. Особливо важливе значення пневмосепарація має при первинному та вторинному очищенні насінневого матеріалу, де необхідно забезпечити високу точність відокремлення домішок і мінімальні втрати повноцінного зерна.

Принцип роботи пневмосепараторів ґрунтується на різниці швидкостей витання частинок зернової суміші у повітряному потоці. Частинки, що мають меншу масу та більший коефіцієнт парусності, захоплюються потоком повітря і виносяться у відходи, тоді як повноцінне зерно осідає під дією сили тяжіння.

Залежно від конструктивних особливостей, способу організації повітряного потоку та технологічного призначення пневмосепаратори класифікують за кількома основними ознаками.

За призначенням пневмосепаратори поділяють на машини для первинного очищення зерна, вторинного очищення та спеціального очищення насінневого матеріалу. Машини первинного очищення використовуються для видалення грубих і легких домішок із зернового вороху після збирання врожаю. Пневмосепаратори вторинного очищення забезпечують більш точне розділення зернової суміші та використовуються переважно при підготовці насіння. Спеціальні пневмосепаратори застосовують для очищення окремих культур або для роботи у складі високопродуктивних зерноочисних комплексів.

За способом створення повітряного потоку пневмосепаратори бувають всмоктувальні, нагнітальні та комбіновані. У всмоктувальних машинах повітряний потік створюється розрідженням, у нагнітальних – надлишковим тиском, а комбіновані системи поєднують обидва способи.

За конструкцією сепарувального каналу розрізняють пневмосепаратори з прямолінійним, вертикальним, похилим і кільцевим каналом. Найбільш ефективними вважаються конструкції з кільцевим пневмосепарувальним каналом, оскільки вони забезпечують рівномірний розподіл повітряного потоку та стабільність технологічного процесу очищення.

За характером руху зернового матеріалу пневмосепаратори поділяють на гравітаційні, відцентрові та комбіновані. У гравітаційних машинах зерно рухається під дією сили тяжіння, у відцентрових – за рахунок дії відцентрових сил, а комбіновані конструкції поєднують декілька принципів переміщення матеріалу.

За рівнем автоматизації пневмосепаратори можуть бути з ручним, напівавтоматичним або автоматичним керуванням. Сучасні конструкції оснащуються системами поточного контролю та автоматичного регулювання параметрів технологічного процесу, що дозволяє підтримувати стабільну якість очищення зерна при зміні його вологості, засміченості та продуктивності машини.

Основними перевагами пневмосепараторів є простота конструкції, висока продуктивність, можливість безперервної роботи, ефективне видалення легких домішок та відносно невеликі енерговитрати. Разом із тим ефективність роботи пневмосепаратора значною мірою залежить від правильного вибору режимів роботи, стабільності повітряного потоку та фізико-механічних властивостей зернового матеріалу.

У сучасних умовах розвитку зернопереробної галузі актуальним напрямом є вдосконалення конструкцій пневмосепараторів та розробка систем автоматичного контролю і управління технологічним процесом очищення зерна, що дозволяє підвищити якість очищення, зменшити втрати повноцінного зерна та забезпечити енергоефективність роботи обладнання.

1.2. Конструктивні особливості сучасних пневмосепараторів

Як окрема функціональна частина у складі обладнання може використовуватися повітряна система (для автономних машин – пневмосепаратор), решітна секція, трієр та інші елементи, робота яких базується на використанні однієї або кількох ознак, що характеризують фізико-механічні властивості культурного насіння та домішок. Розглянемо конструкцію та принцип дії зерноочисної машини на прикладі машини МПО-50 133. Ця машина є стаціонарною, має продуктивність 50 т/год і призначена для попереднього очищення зернової маси від великих і легких домішок. Конструктивно машина складається (рис. 1.1) з приймальної камери та пневмосепарувальної системи. Приймальна камера включає розподільний шнек 4, сітчастий транспортер 3 і

струшувач 2. Пневмосепарувальна система виконана у вигляді замкненого контуру. До її складу входять діаметральний вентилятор 5, пневмосепарувальний канал 10, осадова камера 7, дросельна заслінка 6 та шнек 8.

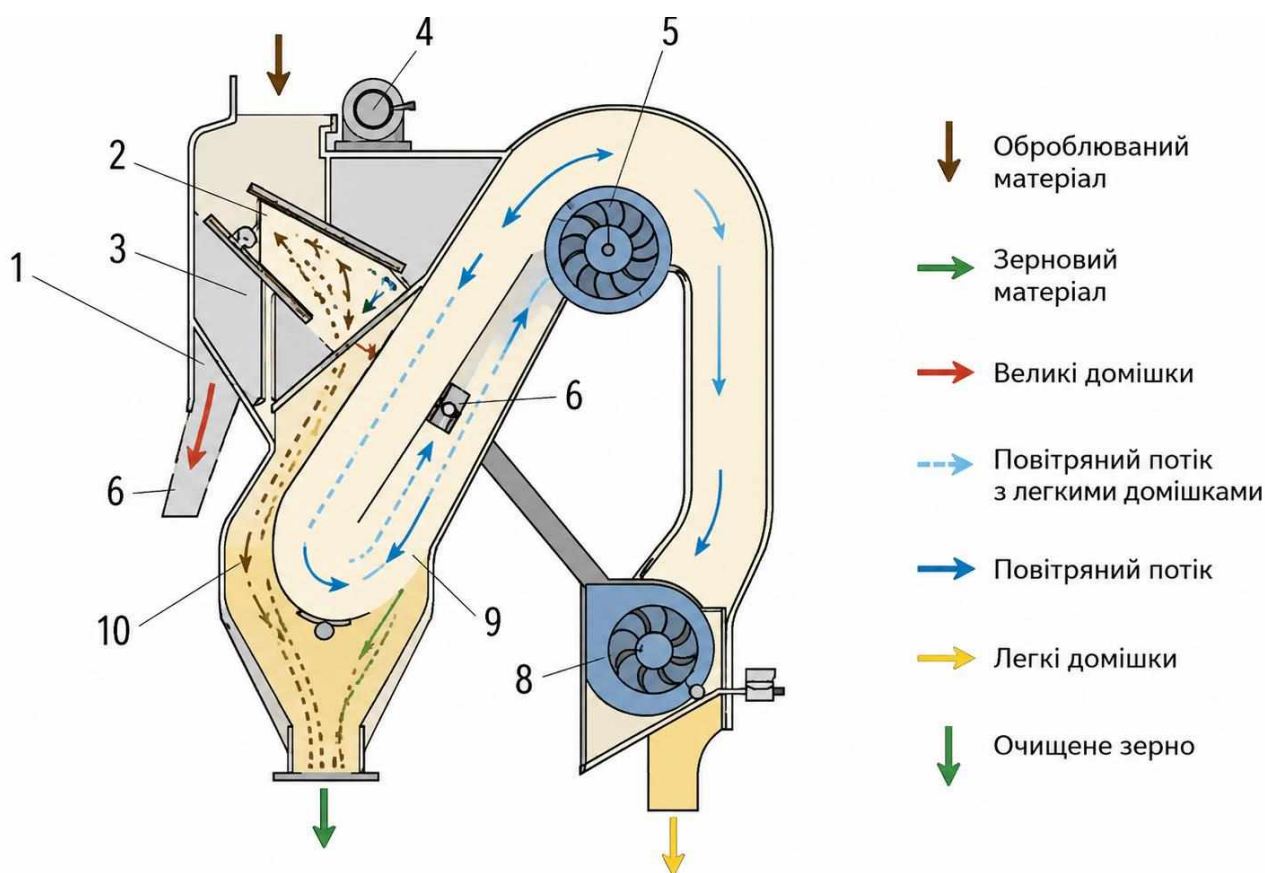


Рисунок 1.1 – Схема очищення зерна в машині МПО-50

Функціонування машини МПО-50 здійснюється наступним чином. Зерновий матеріал подається до шнека 4, який рівномірно розподіляє його по всій ширині агрегату. Після цього ворох, рухаючись по похилому листу, потрапляє на сітчастий транспортер 3. Струшувач 2 забезпечує розшарування суміші на поверхні сітки та покращує проходження зерна крізь неї. Зерно разом із легкими домішками просіюється через сітку, тоді як крупні домішки, зокрема солома, колоски та листя, виводяться за межі машини через окремий канал 1. Далі оброблюваний матеріал надходить до пневмосепараційного каналу 10, де швидкість повітряного потоку регулюється заслінкою 6. У цій зоні легкі домішки під дією висхідного повітряного потоку 9 переміщуються до осадової камери 7. Зерно виводиться з машини самопливом, тоді як легкі домішки транспортуються шнеком 8.

Варто підкреслити суттєве значення повітряних систем машин у процесі очищення зерна.

По-перше, у світі повітряними системами приділяється значна увага. Це пояснюється тим, що за результатами досліджень встановлено можливість видалення повітряним потоком понад 50% домішок [34]. По-друге, пневмосепарація має низку переваг порівняно з іншими методами та засобами очищення зерна. До них належать простота конструкції, висока питома продуктивність машини та незначне пошкодження зерна під час очищення.

$$\vec{R} = -m \cdot K_n \cdot u_r^2 \cdot \frac{\vec{u}_r}{u_r}, \quad (1.1)$$

де m – маса частинки, кг;

K_n – коефіцієнт парусності частинки, м⁻¹ ;

u_r – модуль відносної швидкості частинки, м/с.

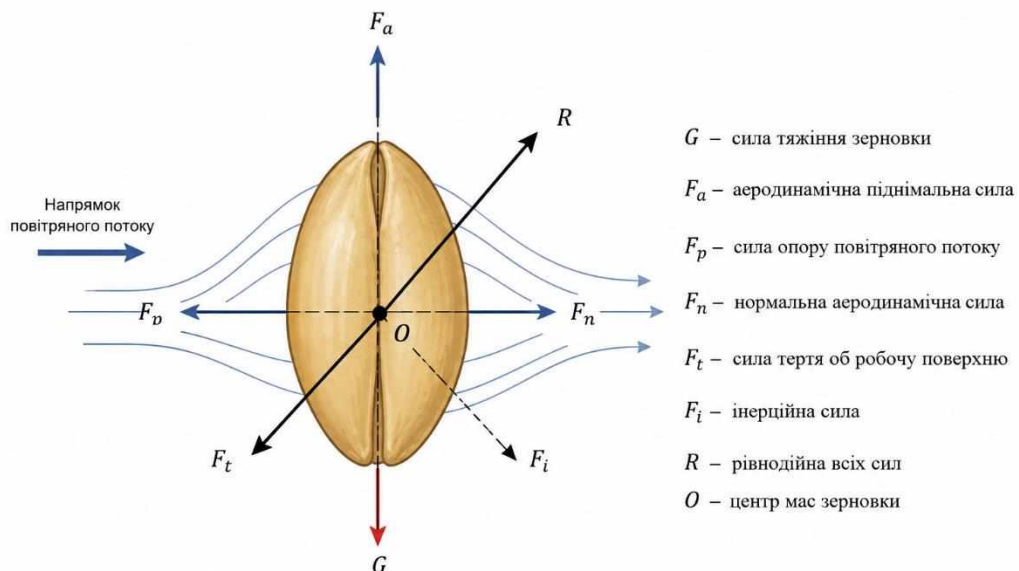


Рисунок 1.2 – Схема сил, що діють на зерновку

Характерною ознакою розділення зернового матеріалу за аеродинамічними властивостями, як правило, є швидкість витання (критична

швидкість) та коефіцієнт парусності. У разі, коли швидкість повітря дорівнює швидкості витання частинки, введеної в повітряний потік, вона перебуває у завислому стані. При цьому сила опору врівноважує силу тяжіння частинки. Взаємозв'язок між швидкістю витання та коефіцієнтом парусності подано у вигляді [17, 18];

Величину швидкості витання визначають за значенням динамічного тиску повітряного потоку в каналі відповідно до виразу 66:

$$u_{\text{вит}} = \sqrt{\frac{2 P_{dv}}{\gamma_B}}, \quad (1.2)$$

де P_{dv} – динамічний тиск, Па:

γ_B – густина повітря, кг/м³.

Величини динамічного тиску встановлюють шляхом вимірювань за допомогою трубки Піто-Прандтля та мікроманометра.

Таблиця 1.1

Вид насіння	Швидкість витання, v _{вит} , м/с	Коефіцієнт парусності Кп, м ⁻¹	Динамічний тиск Р _д , Па
Жито	8,4 ... 10,5	0,09 ... 0,14	44,1 ... 67,3
Пшениця	8,9 ... 11,5	0,07 ... 0,12	48,4 ... 80,7
Ячмінь	8,4 ... 10,8	0,08 ... 0,14	43,1 ... 71,2
Овес	7,0 ... 9,0	0,12 ... 0,20	29,9 ... 49,4
Кукіль	6,9 ... 9,8	0,10 ... 0,21	29,1 ... 58,6
В'юнок	4,5 ... 10,0	0,10 ... 0,48	12,4 ... 61,0
Васильки сині	1,0 ... 6,5	0,23 ... 9,81	0,6 ... 25,8

У таблиці 1.1 наведено значення критичних швидкостей і коефіцієнтів парусності насіння окремих культурних і бур'янових рослин, а також відповідного динамічного тиску повітряного потоку при густині Формула [15, 18].

Відомо, що значення швидкості витання переважно підпорядковуються нормальному закону розподілу [19]. Приклад цього наведено на рисунку 1.3.

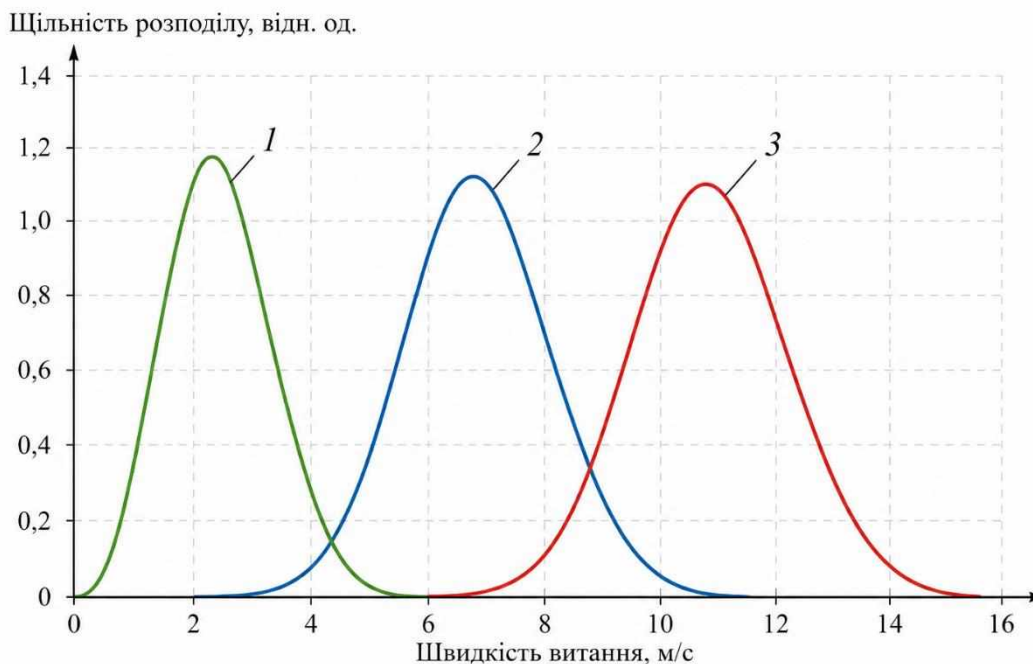


Рисунок 1.3 – Криві розподілу щільності складових зернової суміші за швидкістю витання: 1 - насіння берізки польової, 2 - насіння кукулю, 3 - насіння пшениці

Рівень очищення або ефективність розділення зернового вороху визначається відповідними агротехнічними вимогами. Під час попереднього очищення втрати зерна основної культури у відходах допускаються не більше 0,05%, а ступінь виділення смітної домішки має становити не менше 50%.

У процесі первинного очищення втрати зерна не повинні перевищувати 1,5% у фуражних відходах і 0,5% у невикористовуваних домішках, рівень дроблення – не більше 0,1%, а повнота вилучення домішок має бути не нижче 60%. За умов вторинного очищення загальні втрати повноцінного зерна у всі фракції домішок не повинні перевищувати 5%, а потрапляння зерна до фуражу має бути не більше 3%. Дроблення насіння допускається в межах 0,1%. Рівень виділення домішок повинен становити щонайменше 70% [15, 59, 133].

Відповідно до цих вимог визначають режим роботи пневмосепараційного каналу. Показниками, що характеризують ефективність пневмосепарації, є ступінь виділення легких домішок та втрати повноцінного зерна у відходи.

У реальних умовах функціонування в господарствах спостерігається недостатнє використання технологічного потенціалу ЗОМ. За результатами досліджень, виконаних на фермерському господарстві «Козачка», встановлено, що можливості машин і агрегатів ЗАВ у ряді сільськогосподарських підприємств використовуються лише на 30–60%. Це зумовлено рядом причин.

По-перше, нерівномірна подача зерна із завальної ями спричиняє зміну рівня завантаження зерноочисної машини в часі. Цьому сприяє низька та нерівномірна текучість свіжозібраного зернового вороху, зміна висоти шару зерна в завальній ямі, а також засмічення її вихідного отвору. Усе це значною мірою впливає на якість очищення зерна повітряною системою.

По-друге, характерною є несталість якісних характеристик зернового матеріалу, що надходить на очищення, що істотно впливає на режими роботи ЗОМ. До таких факторів належать вологість, ступінь засміченості, інші фізико-механічні властивості зерна, а також склад домішок. При цьому варіації засміченості та вологості вхідного матеріалу є значними: засміченість змінюється в межах від 3 до 25%, а вологість – від 14 до 45%. Переважно під впливом метеорологічних умов добові коливання вологості зерна можуть досягати 9–10% 142. Під час зберігання свіжозібраного зерна також можливе істотне підвищення вологості через наявність домішок, вологість яких значно перевищує вологість повноцінного зерна 144. Наприклад, згідно з джерелом 78, при вологості вороху жита 25,25% вологість повноцінного зерна становить 22,79%, а смітних домішок – 42,85%. Для пшениці відповідні значення складають 28,56%, 26,92% і 33,31%. У подальшому вологість зростає через виділення вологи в процесі дихання, що ілюструється наступним прикладом. Було встановлено, що зерно в колосках із вологістю 18,57% матиме вологість 19,52% і 22,62%, якщо його відібрати відповідно з бункера комбайна та насипу на зерноочисному комплексі 78.

По-третє, не забезпечується оптимальне значення швидкості повітряного потоку в пневмосепараційному каналі. Вона має відповідати межі швидкостей витання легких домішок і повноцінних зерен очищеної культури. Правильність встановлення швидкості повітряного потоку визначають за складом отриманих

компонентів. Якщо в очищеному зерні залишаються полова, легке насіння інших культур і домішки, швидкість повітря необхідно підвищити, а у випадку винесення значної кількості повноцінного зерна у відходи її слід зменшити [70, 121].

По-четверте, вплив має людський фактор. Післязбиральна обробка зерна належить до найбільш трудомістких галузей сільськогосподарського виробництва, а підприємства, що здійснюють цю обробку, відносяться до складних об'єктів управління. Запровадження потокової технології обробки зерна, з одного боку, зменшило витрати праці, але з іншого – значно ускладнило процес управління

Приклад 2. Як зазначалося раніше, спостерігається значна варіативність якісних характеристик зернового матеріалу залежно від умов вирощування навіть для однієї культури та сорту, при цьому окремі партії вороху з одного поля можуть відрізнитися за складом домішок і рівнем вологості. У зв'язку з цим машиніст повинен виконувати налаштування зерноочисних машин перед обробкою кожної нової партії зерна, однак на практиці це часто не здійснюється.

Додатково слід звернути увагу ще на два аспекти. Першим є напруженість робіт, яка негативно позначається на організації процесів під час збирання та післязбиральної обробки зернового матеріалу. Другим є недостатній рівень обізнаності операторів щодо технологічних основ правильного налаштування та методів усунення незначних типових несправностей машин [121].

Таким чином, вплив людського фактора призводить до того, що фактична пропускна здатність у більшості випадків не перевищує 65–70% від номінального значення 79, а спроби її підвищення супроводжуються зниженням якості кінцевої продукції.

Запровадження системи контролю та управління зерноочисним обладнанням дає змогу відстежувати параметри технологічного процесу і забезпечувати роботу машин у оптимальних режимах, що, у свою чергу, сприятиме підвищенню якісних показників оброблюваного матеріалу.

1.3. Аналіз факторів, що впливають на ефективність сепарації

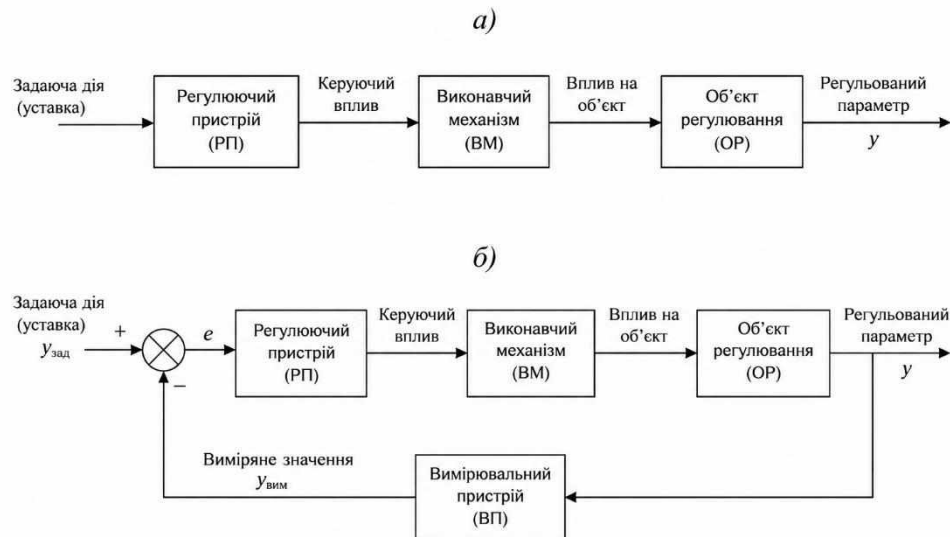
Різноманітне сільськогосподарське обладнання, машини, агрегати, а також їх комплекси є складними динамічними системами, які функціонують в умовах змінних зовнішніх впливів. Роботу такої динамічної системи доцільно розглядати як реакцію на вхідні зовнішні збурення (умови функціонування) та керуючі дії з боку оператора або спеціальних керуючих пристроїв. У результаті ці впливи трансформуються у вихідні параметри. До них належить сукупність показників, що характеризують якість роботи, енергетичні, техніко-економічні характеристики, міцнісні властивості та інші.

З метою підвищення ефективності та інтенсифікації режимів функціонування динамічних систем необхідно вдосконалювати існуючі та створювати нові раціональні системи управління, а також розробляти й впроваджувати такі системи, які здатні працювати автономно без безпосередньої участі обслуговуючого персоналу. Такі системи поділяються на два основні типи.

Перший тип систем управління (у науковій літературі їх зазвичай називають системами управління) функціонує за розімкненим принципом, що буде розглянуто далі. Другий тип – це системи регулювання, до яких належать стабілізуючі, програмні та слідкуючі системи. У стабілізуючих системах забезпечується підтримання значень вихідної величини на заданому рівні, прикладом чого є глибина обробітку ґрунту або номінальна товщина шару хлібної маси в комбайнах. Програмні системи відтворюють зміну вихідного параметра відповідно до наперед заданої програми, наприклад, регулювання температури повітря в інкубаторі або зміна температури ґрунту і повітря в теплицях залежно від часу доби. До слідкуючих систем належать системи автоматичного водіння тракторних агрегатів і комбайнів, а також системи слідкуючих електроприводів та інші [8, 18].

Розглянемо характерні особливості систем управління технологічними процесами, що функціонують за розімкненими та замкненими циклами. У розімкненій системі (рис. 1.4, а) вхідний сигнал x_{ex} подається на керуючий

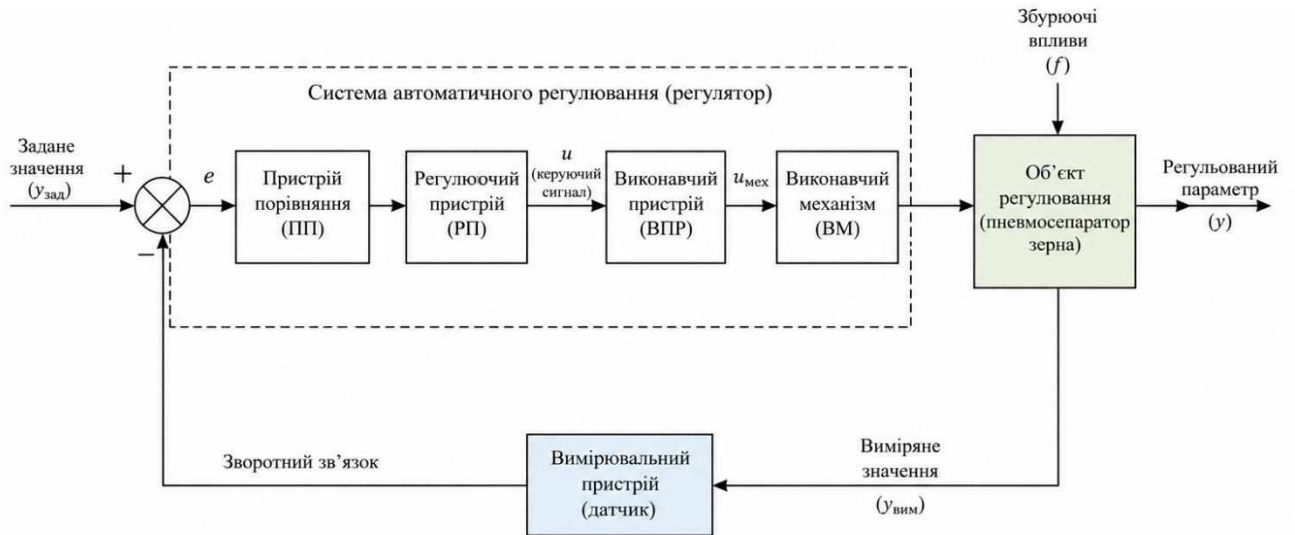
пристрій 1. У цьому пристрої сигнал x_{ex} перетворюється на змінений сигнал (параметр x), який впливає на керований об'єкт 2. У результаті формується вихідний параметр $x_{вих}$.



Рисунк 1.4 – Схеми регулювання за розімкненим (а) і замкнутим (б) циклами

У ролі керуючого пристрою може виступати будь-який ручний орган керування. Крім того, прикладом подібної системи є система індикації режимів роботи різного обладнання, у якій за станом контрольних кінцевих вимикачів відбувається інформування оператора за допомогою сигнальних ламп.

Характеристики подібних систем та їх здатність максимально ефективно виконувати покладені функції визначаються властивостями окремих складових елементів. З технічної точки зору це реалізується із застосуванням механічних вузлів, гідравлічних систем, електричних машин, а також силової і малопотужної електроніки.



ПП – пристрій порівняння (формування похибки $e = u_{зад} - u_{вим}$);
 РП – регулюючий пристрій (формує керуючий сигнал u залежно від похибки e);
 ВПр – виконавчий пристрій (підсилює або перетворює керуючий сигнал);
 ВМ – виконавчий механізм (впливає на об'єкт регулювання);
 Датчик – вимірює регульований параметр y та формує сигнал зворотного зв'язку.

Рисунок 1.5 – Функціональна схема системи регулювання

Узагальнена блок-схема системи автоматичного керування зерноочисними машинами

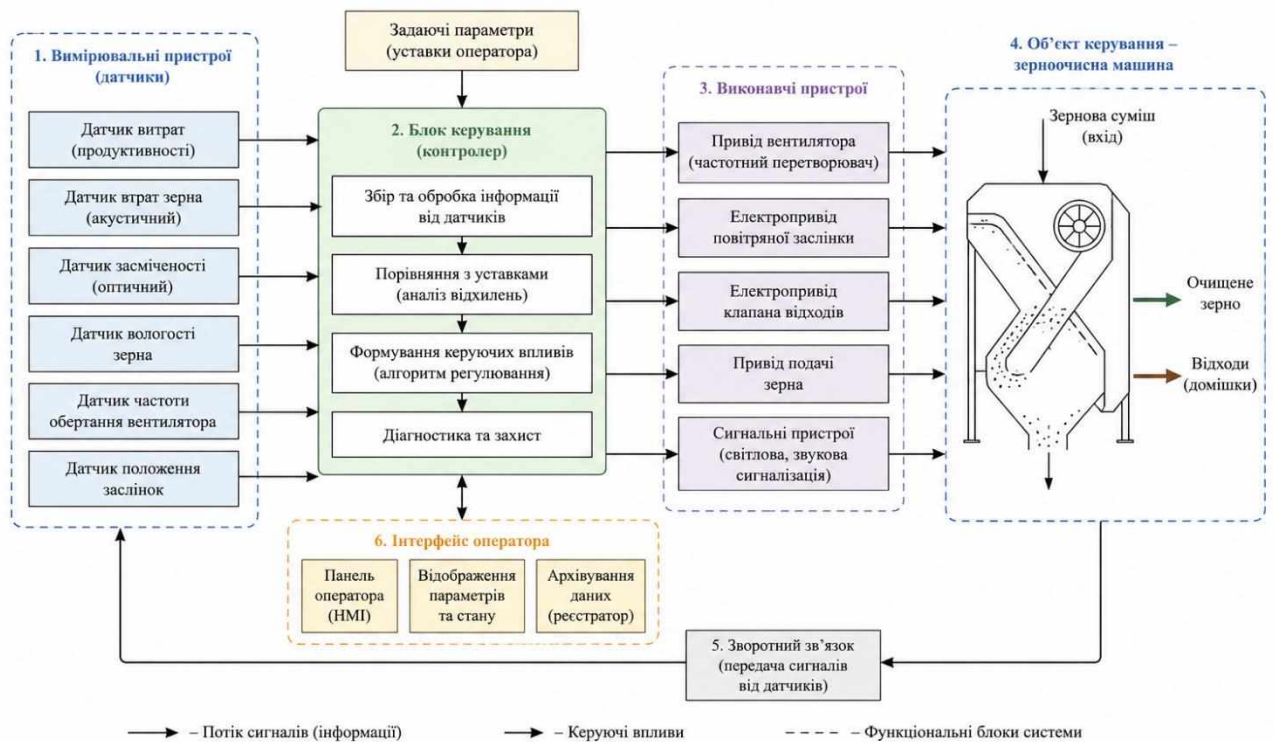


Рисунок 1.6 – Узагальнена блок-схема системи автоматичного керування зерноочисними машинами

На рисунку 1.6 представлено узагальнену блок-схему системи автоматичного керування зерноочисними машинами, яка забезпечує контроль, регулювання та стабілізацію технологічного процесу очищення зернового матеріалу. Система побудована за принципом замкнутого циклу із використанням зворотного зв'язку між основними функціональними елементами.

До складу системи входять вимірювальні пристрої (датчики), блок керування, виконавчі пристрої, об'єкт керування, система зворотного зв'язку та інтерфейс оператора.

Блок вимірювальних пристроїв призначений для безперервного контролю параметрів технологічного процесу. У схемі передбачено використання датчика витрат (продуктивності), акустичного датчика втрат зерна, датчика засміченості, датчика вологості зерна, датчика частоти обертання вентилятора та датчика положення заслінок. Інформація з датчиків передається до блоку керування у вигляді інформаційних сигналів.

Центральним елементом системи є блок керування (контролер), який здійснює збір та обробку інформації від датчиків, аналіз відхилень параметрів від заданих значень та формування керуючих впливів відповідно до алгоритму регулювання. Крім того, у блоці керування реалізовані функції діагностики та захисту системи.

Сформовані керуючі сигнали надходять до виконавчих пристроїв, які забезпечують безпосередній вплив на технологічний процес. До них належать привід вентилятора з частотним перетворювачем, електропривід повітряної заслінки, електропривід клапана відходів, привід подачі зерна та сигнальні пристрої світлової й звукової індикації.

Об'єктом керування у системі є зерноочисна машина, до якої надходить зернова суміш. У процесі роботи машина виконує розділення матеріалу на очищене зерно та відходи (домішки). Ефективність процесу очищення залежить від стабільності режимів роботи виконавчих механізмів та своєчасного коригування параметрів технологічного процесу.

Система зворотного зв'язку забезпечує передачу інформації від датчиків до контролера для постійного контролю стану процесу очищення. Завдяки цьому система автоматичного керування здатна оперативно реагувати на зміну продуктивності, вологості, засміченості зернового матеріалу та інших факторів, що впливають на якість сепарації.

Інтерфейс оператора призначений для взаємодії людини з автоматизованою системою. За допомогою панелі оператора здійснюється введення заданих параметрів, відображення поточних режимів роботи та архівування технологічних даних.

Таким чином, представлена блок-схема ілюструє принцип функціонування автоматизованої системи керування зерноочисною машиною, яка забезпечує підвищення ефективності очищення зерна, зменшення втрат повноцінного зерна у відходи та стабілізацію технологічного процесу.

Запропоновані системи управління очисних машин для різних сипучих матеріалів наведені нижче.

На рисунку 1.7 представлено пристрій для сортування сипучих матеріалів 2, який належить до борошномельно-елеваторної промисловості. Пристрій містить дві системи управління, що працюють за замкнутим циклом.

На рисунку 1.7 наведено пристрій для сортування сипучих матеріалів 2, який застосовується у борошномельно-елеваторній галузі. Конструкція включає дві системи керування, що функціонують за замкненим циклом.

Призначення першої системи управління полягає у стабілізації подачі зернового матеріалу в пневмосепараційний канал 1 шляхом підтримання сталого рівня матеріалу в живильнику 5. Оптимальне значення подачі матеріалу попередньо встановлюється за рахунок поєднання таких параметрів, як величина щільного зазору рейкової засувки 9 і кут нахилу вібротка 6. Регулювання кута нахилу здійснюється за допомогою тяг 8, а величина зазору змінюється рейковим механізмом. Віброток приводиться в дію віброприводом 7. Поточне значення НФ рівня матеріалу в живильнику визначається датчиком 10, тоді як задавач 11 формує заданий рівень НЗ. У разі відхилення між значеннями НФ і НЗ

порівнюючий пристрій 12 формує сигнал неузгодженості, на основі якого регулюючий пристрій 13 через виконавчий механізм 14 і шибер 15 змінює подачу матеріалу в живильник для зменшення різниці між фактичним і заданим значеннями.

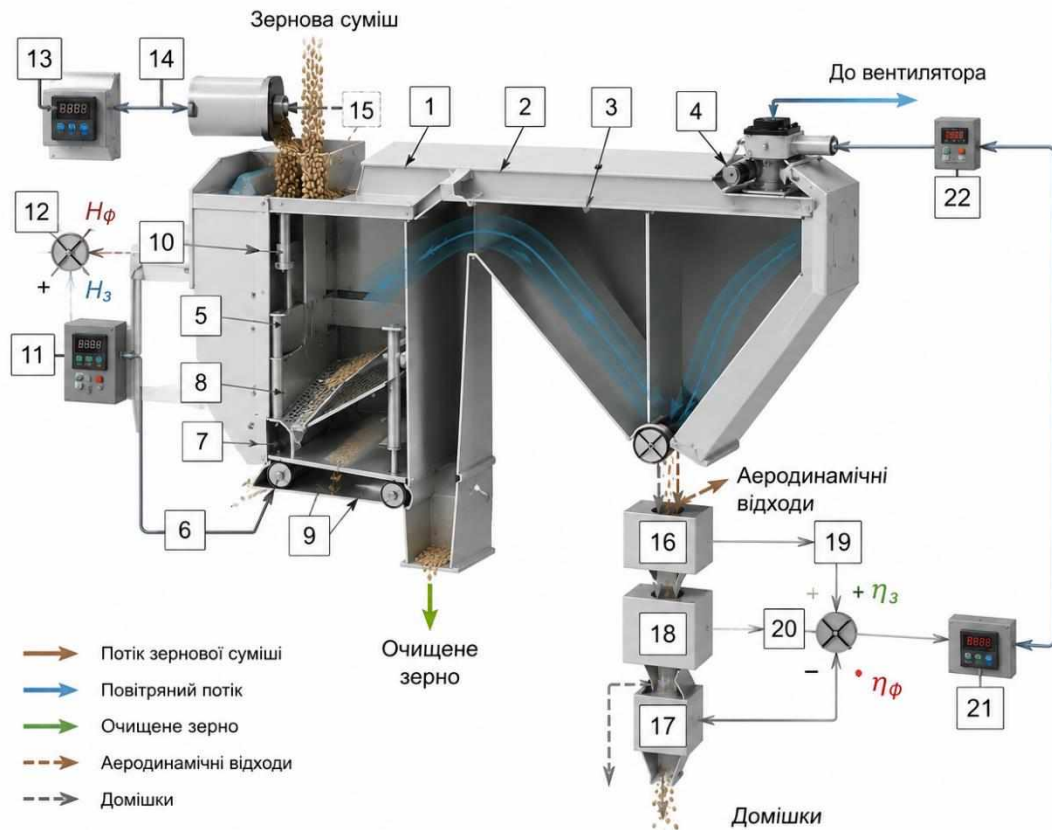


Рисунок 1.7 – Пристрій для сортування сипучих матеріалів

Пневмосистема здійснює розділення матеріалу відповідно до його аеродинамічних характеристик. У процесі роботи пристрою разом із легкими домішками може частково виноситися і повноцінне зерно в осадову камеру 2. Для запобігання перевищенню допустимого рівня втрат зерна застосовується друга система керування. З цією метою виконується безперервне зважування відходів за допомогою поточного витратоміра 16 і їх поділ за фракціями на контрольному розділювачі 18. Фактична величина втрат зерна ϕ визначається витратоміром 17 і порівнюється із заданим значенням z . Задане значення задається у вигляді певного відсотка від загальної кількості відходів, який обчислюється дільником 19. У разі

розбіжності між з і ф порівнюючий пристрій передає сигнал на регулюючий пристрій 21, який через виконавчий механізм 22 змінює положення заслінки 4. Таким чином, регулювання швидкості повітряного потоку в пневмосепараційному каналі забезпечує підтримання втрат зерна на заданому рівні.

Недоліком даного пристрою є складність виготовлення контрольного розділювача, який використовується в системі регулювання швидкості повітря для відокремлення повноцінного зерна від відходів.

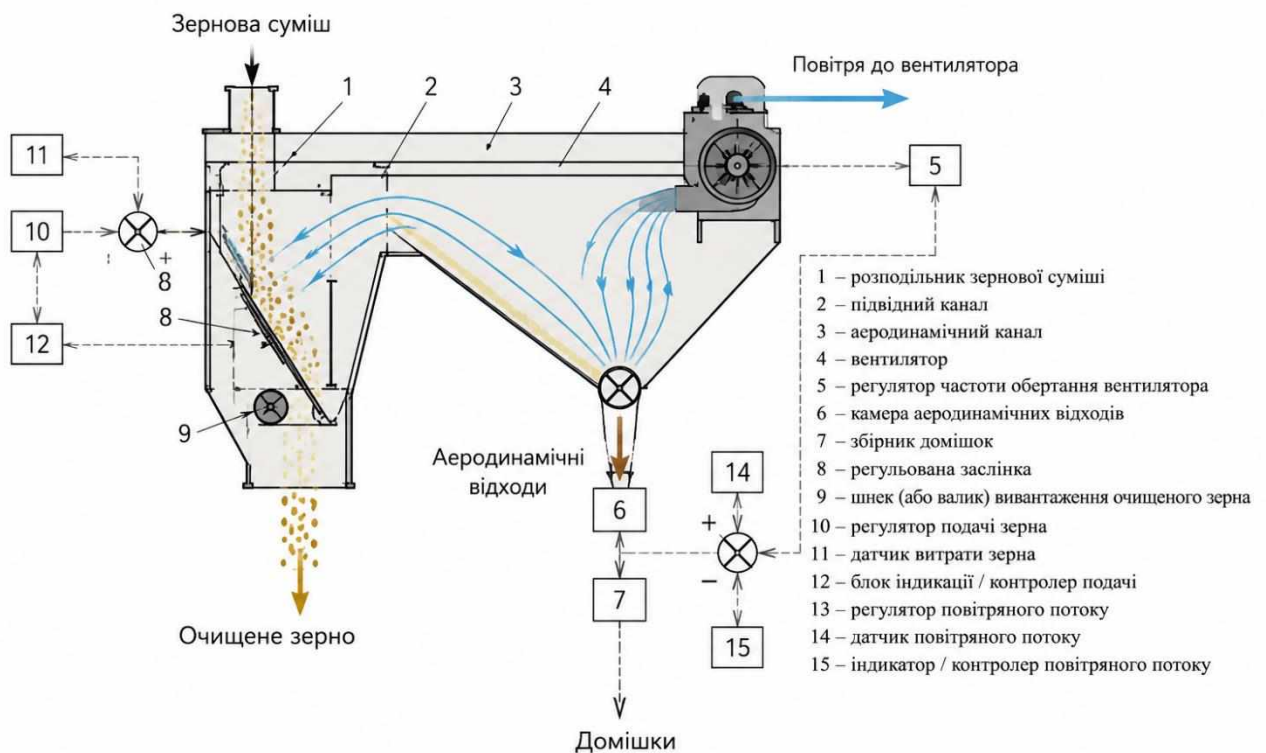


Рисунок 1.9 – Машина для розділення матеріалів з різними аеродинамічними властивостями

На рисунку представлено машину для розділення матеріалів з різними аеродинамічними властивостями, призначену для очищення зернового матеріалу від легких домішок за допомогою повітряного потоку. Принцип роботи машини ґрунтується на відмінності швидкостей витання частинок зернової суміші, що дозволяє ефективно відокремлювати повноцінне зерно від легких органічних та мінеральних домішок.

Зернова суміш надходить у розподільник 1, звідки через підвідний канал 2 подається в аеродинамічний канал 3. У каналі на матеріал діє повітряний потік, створений вентилятором 4. Інтенсивність повітряного потоку регулюється зміною частоти обертання вентилятора за допомогою регулятора 5 та регульованої заслінки 8.

У процесі сепарації легкі домішки та пил захоплюються повітряним потоком і транспортуються до камери аеродинамічних відходів 6, після чого надходять у збірник домішок 7. Повноцінне зерно, яке має більшу масу та швидкість витання, опускається вниз і вивантажується через шнек або валик 9 у зону очищеного зерна.

Для забезпечення стабільності технологічного процесу машина обладнана системою контролю та регулювання. Регулятор подачі зерна 10, датчик витрати зерна 11 та блок індикації або контролер подачі 12 забезпечують контроль продуктивності машини. Регулятор повітряного потоку 13, датчик повітряного потоку 14 та контролер повітряного потоку 15 призначені для підтримання оптимального режиму роботи вентиляційної системи.

Завдяки автоматизованому контролю подачі зерна та параметрів повітряного потоку забезпечується підвищення ефективності очищення, зниження втрат повноцінного зерна та стабілізація роботи машини в умовах зміни фізико-механічних властивостей зернового матеріалу.

Недоліком цього пристрою є наявність двох автономних систем регулювання, а також неекономічний спосіб керування продуктивністю вентилятора через використання дроселюючих заслінок. Окрім цього, розміщення мікрофона всередині запиленого повітряного потоку знижує надійність його роботи.

1.4. Сучасні системи контролю та автоматизації

Сучасний розвиток зерноочисної техніки нерозривно пов'язаний із впровадженням автоматизованих систем контролю та керування технологічними процесами. Використання датчиків, програмованих логічних контролерів (PLC)

та SCADA-систем дозволяє забезпечити стабільність режимів роботи пневмосепараторів, підвищити якість очищення зерна, зменшити втрати повноцінного зерна та підвищити енергоефективність обладнання. Особливого значення такі системи набувають в умовах змінних фізико-механічних властивостей зернового матеріалу, коли необхідне оперативне регулювання параметрів роботи машини.

Основою автоматизованих систем контролю є вимірювальні датчики, які забезпечують безперервний моніторинг технологічних параметрів роботи пневмосепаратора.

Датчик – це перетворювач однієї контрольованої перетворення однієї фізичної величини в іншу фізичну величину (сигнал), яку зручно надалі використовувати для перетворення або вимірювання. Другим, більш точним формулюванням датчика є перетворення енергії, зокрема енергії одного виду в інший [23].

Існує велика різноманітність датчиків, що відрізняються за природою вимірюваної величини, а також принципом дії. Вимірюваною величиною може бути тиск, рівень, зусилля, вологість, звук, тепло, світло, переміщення та інші 83, що несуть інформацію про стан об'єкта або події в ньому. Класифікація за принципом дії, або характером перетворення, наведена на рисунку 1.10 33.

Датчики також відрізняються за видом вихідного сигналу і необхідністю зовнішнього живлення. Сюди належать активні і пасивні датчики. У активних (генераторних) вихідною величиною є електричні параметри, такі як струм, напруга, заряд, електрорушійна сила (ЕРС). Пасивні (параметричні) характеризуються такими вихідними величинами, як опір, ємність, індуктивність, діелектрична і магнітна проникність, і для них потрібне джерело енергії (струму або напруги), щоб отримати на виході датчика електричний сигнал [6, 33]. Відношення одиниць вимірювання вхідних і вихідних величин називається чутливістю вимірювального пристрою 24.

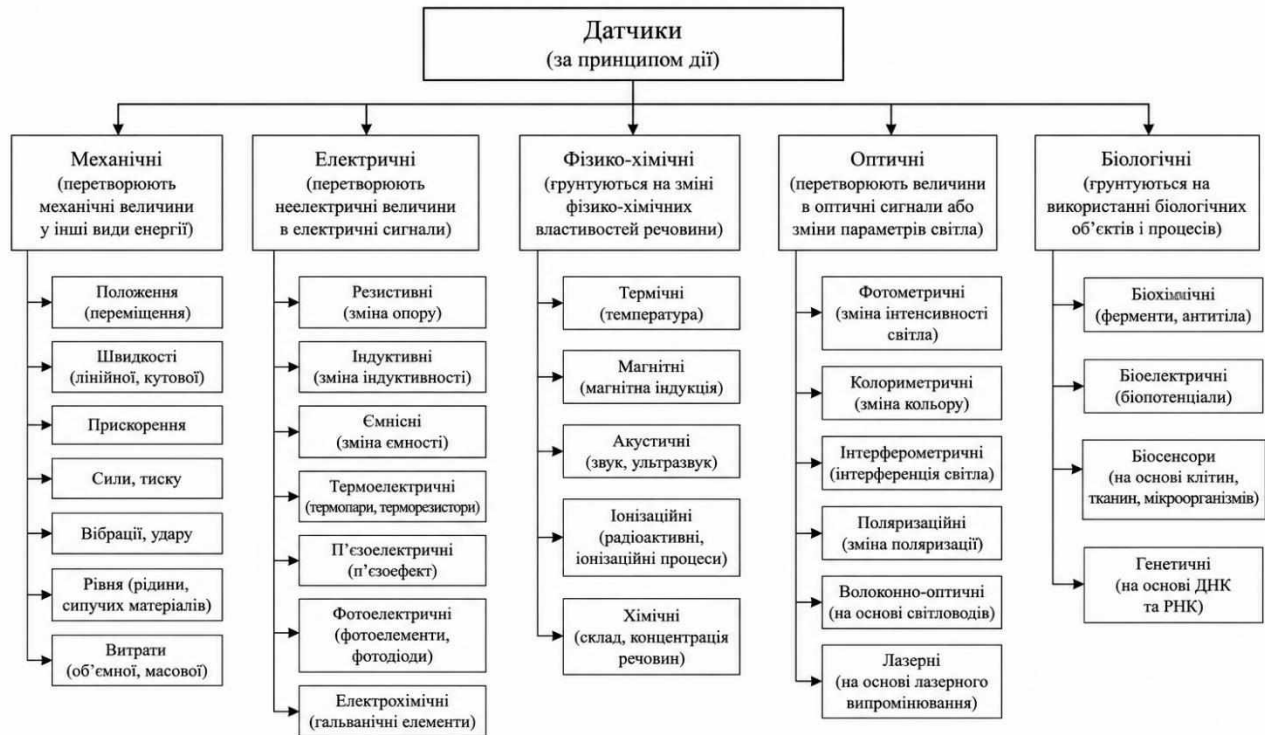


Рисунок 1.10 – Класифікація датчиків за принципом дії

У сфері сільського господарства найбільш широкого поширення набули датчики, що перетворюють неелектричну величину в електричну (напругу, струм, частоту). На рисунку 1.11 наведена функціональна схема датчика, який може складатися як з одного, так і з кількох перетворювачів 33.

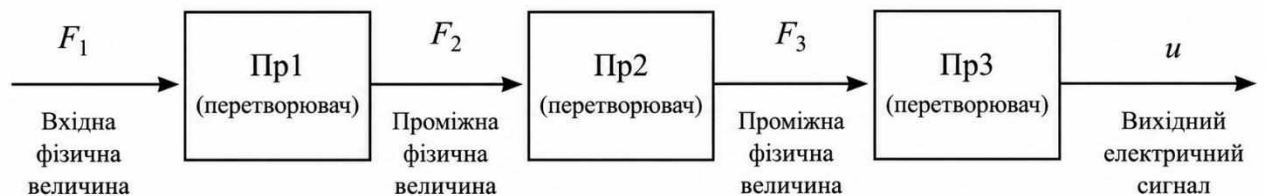


Рисунок 1.11 – Функціональна схема датчика: Пр1, Пр2, Пр3 – перетворювачі; F_1 – вхідна фізична величина; F_2 , F_3 – проміжні фізичні величини; u – вихідний електричний сигнал.

Також використовують датчики тиску, швидкості повітряного потоку, засміченості зерна, вологості матеріалу, продуктивності та втрат зерна у відходи.

Датчики тиску застосовуються для контролю параметрів повітряного потоку в пневмосепарувальних каналах. Вони дозволяють визначати перепади тиску, що виникають у системі під час роботи вентилятора та проходження зернового матеріалу. Отримані сигнали використовуються для автоматичного регулювання продуктивності вентилятора та підтримання оптимальної швидкості повітряного потоку. Це забезпечує стабільність процесу сепарації та зменшує ймовірність винесення повноцінного зерна у відходи.

Для вимірювання швидкості повітряного потоку використовують анемометричні або диференціально-манометричні датчики. Вони забезпечують контроль швидкості витання частинок зернової суміші у пневмосепараторі. На основі показників датчиків система автоматично коригує частоту обертання вентилятора за допомогою частотного перетворювача. Це дозволяє підтримувати необхідний режим роботи при зміні вологості зерна, продуктивності машини або ступеня засміченості матеріалу.

Важливу роль у сучасних зерноочисних машинах відіграють датчики засміченості зерна. Для їх реалізації застосовують оптичні, фотоелектричні або акустичні принципи дії. Оптичні датчики контролюють кількість домішок шляхом аналізу інтенсивності світлового потоку або кольорових характеристик зернової суміші. Акустичні датчики визначають рівень втрат зерна за параметрами звукового сигналу, що виникає при ударах зернівок об поверхні осаджувальної камери пневмосепаратора. Використання таких датчиків дозволяє оперативно визначати ефективність процесу очищення та своєчасно вносити коригування в роботу машини.

Розглянемо датчики для вимірювання витрати і вологості сипучого матеріалу та інші.

Витратоміром називають пристрій, призначений для визначення кількості матеріалу, що проходить за одиницю часу. У ролі матеріалу можуть виступати тверді, рідкі або газоподібні середовища. Розглянемо витратоміри сипучих матеріалів у контексті застосування в зерноочисних машинах.

Існує кілька методів вимірювання витрати даного матеріалу в потоці:

Ваговий автоматичний метод. Цей метод, у свою чергу, поділяється на ваги періодичної (дискретної) і безперервної дії. Для ваг періодичної дії характерне зважування окремих порцій матеріалу (масові). Тобто відбувається періодичне заповнення ємності (наприклад, ковша), її зважування та спорожнення. Далі процес повторюється. Такий метод для ЗОМ, що працюють у потоці, малоприменюваний. Витратоміри безперервної дії поділяються не лише на масові, але й на об'ємні. До масових належать конвеєрні ваги, для кількох опор стрічки яких основою є електронні силосимірювальні елементи (наприклад, тензодатчики). Тут визначається маса матеріалу, що знаходиться на ділянці довжини стрічки, пройденій за одиницю часу [17, 18]. Дане рішення ускладнює пристрій і збільшує габарити машини.

При динамічно-ваговому методі вирішальну роль відіграє величина тиску потоку сипучих матеріалів на рухомий підпружинений лоток, що визначає значення витрати [17, 18, 24]. Простота і малі габарити конструкції дозволяють легко інтегрувати витратомір із ЗОМ або існуючим зернопроводом (рис. 1.14) [137].

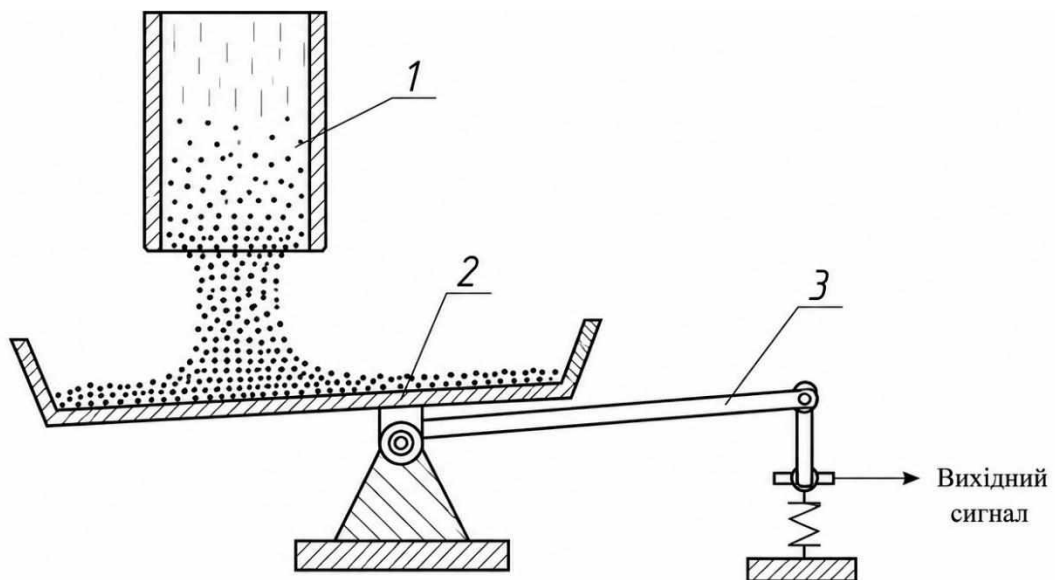


Рисунок 1.12 – Схема динамічно – вагового витратоміра: 1 - канал, 2 - лоток, 3 - коромисло

У разі застосування у витратомірі тензOMETричної балки значення витрати зерна можна визначити за величиною електричного опору розташованих на балці тензорезисторів. Балка дає пропорційну деформацію від зусилля на неї, що, у свою

чергу, викликає зміну поперечного перерізу і довжини тензорезисторів, а отже, і їх опору. Таким чином, опір є функцією витрати. За допомогою електронних пристроїв значення опору нескладно перетворити у значення електричної напруги, сили струму, частоти та інші види для зручності подальшої обробки.

На даний момент випускається чимало динамічно – вагових витратомірів [156, 157], [158, 159], які інтегруються у зернопроводи. Наприклад, такий тип витратоміра застосований на лінії зволоження зерна на борошномельному виробництві АСУ ТП Композит-09/УВ-3 (рис. 1.15). Відзначається, що перевагами даного витратоміра є простота конструкції і висока точність вимірювання, що становить 0,15%. Вимірювальна частина витратоміра не чутлива до пилу, а сам пристрій є достатньо компактним 69.

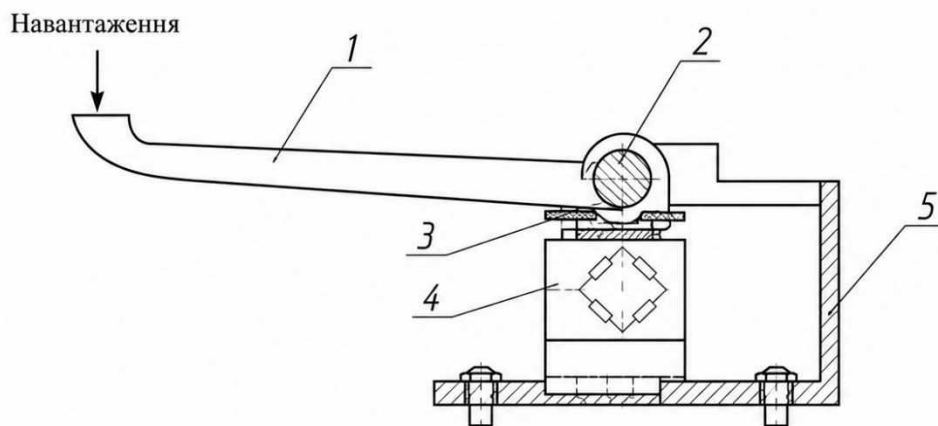


Рисунок 1.13 – Схема тензометричного вагового пристрою: 1 – лопатка, 2 – вісь, 3 – прокладка, 4 – тензодатчик, 5 – кронштейн.

Отже, з метою вимірювання пропускної здатності пневмосепаратора доцільно використання поточного динамічно-вагового витратоміра завдяки його простій конструкції, надійності, нечутливості до пилу, точності вимірювання, а також компактності.

Силовий метод передбачає визначення витрати за значенням моменту на валу обертового диска з лопатками. Опір обертанню створює сипучий матеріал, який надходить на диск. Даний метод ускладнює машину, збільшує енерговитрати на очищення і підвищує кількість травмованого зерна.

При тахометричному методі вимірюється швидкість обертання крильчатки, турбінки або іншого тіла при русі матеріалу. Тахометричний датчик (тахогенератор) перетворює механічне обертання в електричний сигнал. При цьому існує пропорційна залежність між напругою, що виробляється тахогенератором, і частотою обертання. Залежно від виду вихідного сигналу бувають постійної і змінної напруги. Застосовуються як вимірювачі кутової швидкості. У запилених умовах очищення зерна необхідне часте очищення крильчатки і обслуговування підшипникового вузла останньої.

Електромагнітний метод використовує високочастотне електромагнітне поле. При роботі такого витратоміра вимірюється частота і амплітуда сигналу, відбитого від матеріалу. Відсутність рухомих частин значно підвищує надійність пристрою, однак він має складну електронну схему.

Крім цього існують інші методи вимірювання витрати сипучих матеріалів. оптичні і мембранні витратоміри складно пристосувати до конструкції ЗОМ. До того ж через великий вміст пилу в зерновому матеріалі відбудеться швидке забивання оптичних датчиків. П'єзоелектричні датчики [15, 19] знайшли широке застосування в зернозбиральних комбайнах. Однак, розмістивши такі датчики у потоці повітря, можливе порушення структури повітряного потоку і їх забивання пилом і домішками, що може вплинути на їх працездатність. Такі витратоміри зерна, як радіоізотопні, можуть становити небезпеку для обслуговуючого персоналу. Мікрохвильові витратоміри є дорогими і досить складними вимірювальними системами.

Для вимірювання вологості сільськогосподарських матеріалів використовуються вологоміри. За принципом роботи вологоміри бувають діелектрометричні (ємнісні), резистивні, термогравіметричні, інфрачервоні, надвисокочастотні та інші.

У діелектрометричних вологомірах визначення вологості відбувається за рахунок вимірювання діелектричної проникності, яка є функцією вологості матеріалу. Бувають датчики з довільним засипанням, із самоущільненням і з примусовим ущільненням. Найбільшого поширення набули датчики другої групи.

У них зерно під власною вагою падає в вимірювальний конденсатор з певної висоти, що робить пристрій конструктивно простим. Однак над вологоміром необхідний зернопровід, у якому верхні шари створюватимуть самоущільнення матеріалу в зоні вимірювання. Це накладає обмеження на вбудовування пристрою у готову ЗОМ. Також недоліком діелектрометричних вологомірів є вплив температури, густини матеріалів, розмірів частинок, стану поверхні матеріалу, для чого існують методи поправок.

Загалом цей тип вологомірів рекомендований для роботи в потокових умовах. Діапазон вимірювання у потокових діелектрометричних вологомірів від 9 до 30% з абсолютною похибкою від [1, 0] до 18% і вище 140. Вологомір має діапазон вимірювання 6 - 24% з абсолютною похибкою 1,5%. Також існує італійський потоковий вологомір зерна Isoelectric GRAIN DRYER PLUS з діапазоном вимірювання 4–38% і точністю 0,5%.

У кондуктометричних (резистивних) вологомірах принцип роботи базується на залежності електричного опору зволоженого матеріалу від рівня його вологості. За конструктивним виконанням вони є найпростішими та найдешевшими. Значний вплив на результати вимірювання чинять хімічний склад матеріалу, сорт зерна, а також район вирощування і ґрунтово-кліматичні умови місцевості [67, 140]. Згідно з досвідом вітчизняної і світової практики, цей метод визначення вологості характеризується низькою точністю вимірювань 154, що обумовлює недоцільність його використання в ЗОМ.

Принцип дії термогравіметричних вологомірів ґрунтується на застосуванні методів висушування вологих зразків до сталої маси. Як еталонний прийнятий вакуумно-тепловий метод видалення вологи. Цей метод, при сушінні кондиційованим повітрям, є найбільш точним у порівнянні з сушінням у сушильній шафі. Недоліком термогравіметричних вологомірів є велика тривалість процесу вимірювання. Застосування цього пристрою в потоці буде давати неактуальні значення вологості в часі.

В інфрачервоних вологомірах використовується залежність відбиття або поглинання вологими матеріалами ділянки ІЧ-спектра, в якій вода має ряд смуг

поглинання (від [0, 7] до [3, 0] мкм). Діапазон вимірювання вологомірів [0, 3] – 80%, абсолютна похибка [0, 25] – 7, або може бути наведена приведена похибка (наприклад, 10%). Переваги цього методу: висока чутливість, експресність (швидкість вимірювання), можливість визначати разом із вологою інші компоненти речовини. Однак недоліком таких приладів є наявність похибки вимірювання вологості при неоднорідному розподілі вологи по товщині, оскільки вологість визначається на поверхні шару частинок матеріалу. Це може бути характерно для матеріалу, щойно пройшов процедуру сушіння. Даний вологомір мало поширений на ринку.

У надвисокочастотних (СВЧ) вологомірах принцип дії ґрунтується на використанні амплітудних, фазових і резонансних методів СВЧ-вологометрії.

Серед них найбільш поширені амплітудні СВЧ-вологоміри, оскільки вони є найбільш простими, надійними, мають невисоку вартість і прості в обслуговуванні. Для двопараметрових СВЧ-вологомірів характерна вища чутливість і менша залежність показань від густини, температури контрольованого матеріалу (які є основними завадними факторами) і хімічного складу. Такі вологоміри є більш універсальними, ніж інші типи електричних вологомірів (вимірювання вологості зерна, борошна, круп, насіння, добрив, молочних продуктів одним і тим самим вологоміром). Діапазон вимірювання 10 - 35% з абсолютною похибкою [0, 5] – 17% і вище. Вологомір FOX 1SH дозволяє вимірювати вологу матеріалу в межах 0-100% при температурі навколишнього середовища $-20+95^{\circ}\text{C}$. Даний вологомір, наприклад, розміщують у бункері малогабаритного плющильника. Його завдання – замінити ручне регулювання процесу на автоматичне (без участі оператора). На борошномельному виробництві АСУ ТП Композит-09/УВ-3 у системі зволоження для вимірювання вологості зерна використовується СВЧ-вологомір MR 113.1, який дозволяє визначати вологість у безперервному режимі безпосередньо в зернопроводах, забезпечує автоматичну корекцію відповідно до зміни температури зерна. Пропускна здатність становить 1000-2500 кг/год. При періодичному метрологічному контролі вологості зерна дозволяє досягти точності вимірювання

до 0,5%, що відповідає стандарту. Також випускається потоковий датчик-вологомір M-Sens 2 виробництва SWR engineering (Німеччина), який має діапазон вимірювання 0–65% з похибкою 0,1% при проведеній калібровці 170. Аналогічний останньому існує вимірювач HUMY 3000 від Mtec Instruments GmbH 172. Даний тип вологомірів можливо інтегрувати з існуючим ЗОМ або зернопроводом і рекомендований для цього 106.

Для нормального функціонування датчиків використовуються додаткові узгоджувальні (вимірювальні) електронні схеми як у складі датчиків, так і поза ними. Причиною цього є те, що вихідний сигнал (пасивного) датчика часто є слабким за величиною і може містити шуми та завади. До того ж мала величина сигналу може не сприйматися безпосередньо контролерами або іншими вимірювальними пристроями, а без живлення і збудження робота деяких датчиків є неможливою. У мікромеханічних приладах така електроніка називається електронним засобом обробки сигналів (вимірювальних і керуючих).

Існує загальна тенденція розміщувати узгоджувальну схему всередині датчика. Однак, з одного боку, це не завжди технічно можливо реалізувати, з іншого – відбувається розвиток інтегрування електроніки з чутливими елементами датчиків на одному кристалі (мікрочіпі), що також називаються інтегральними датчиками або мікроелектромеханічними системами. Причиною такої тенденції є уникнення завад, наведень у схемах, а також паразитних параметрів провідників (ємність, опір).

У підсумку для вимірювання вологості зерна, що надходить у пневмосепаратор, доцільно використовувати вологомір діелектрометричного типу або СВЧ-вологомір, які мають необхідні характеристики для вимірювання вологості в потоці і широко представлені на ринку.

Для обробки інформації від датчиків та реалізації алгоритмів керування використовують PLC-контролери (Programmable Logic Controller). Програмований логічний контролер є центральним елементом автоматизованої системи керування. Він забезпечує збір сигналів від вимірювальних пристроїв,

аналіз параметрів технологічного процесу, формування керуючих команд та передачу їх виконавчим механізмам.

У системах керування пневмосепараторами PLC-контролери використовуються для регулювання частоти обертання вентилятора, керування положенням повітряних заслінок, зміни продуктивності подачі зернового матеріалу та контролю роботи виконавчих механізмів. Контролер працює за задалегідь заданим алгоритмом, що забезпечує автоматичне підтримання оптимальних режимів очищення зерна.

Перевагою PLC-систем є висока надійність, швидкодія, стійкість до промислових завад та можливість програмної адаптації до різних умов експлуатації. Крім того, сучасні контролери підтримують інтеграцію з іншими цифровими системами підприємства та дозволяють здійснювати дистанційний моніторинг технологічного процесу.

Для візуалізації, диспетчерського контролю та архівування даних застосовують SCADA-системи (Supervisory Control And Data Acquisition). SCADA-система забезпечує відображення поточних параметрів роботи пневмосепаратора на екрані оператора в режимі реального часу. За допомогою SCADA оператор може контролювати продуктивність машини, швидкість повітряного потоку, рівень втрат зерна, ступінь засміченості та інші параметри технологічного процесу.

SCADA-системи дозволяють виконувати автоматичне збереження технологічних параметрів, формування звітів, аналіз аварійних ситуацій та діагностику стану обладнання. У разі виникнення відхилень система може автоматично подавати попереджувальні сигнали або змінювати режим роботи обладнання для запобігання аварійним ситуаціям.

Використання сучасних систем контролю та автоматизації у пневмосепараторах зерна дозволяє значно підвищити ефективність технологічного процесу очищення. Автоматичне регулювання параметрів роботи машини забезпечує стабільну якість очищення зерна, зменшує втрати повноцінного матеріалу, підвищує продуктивність обладнання та знижує

енерговитрати. Крім того, автоматизація сприяє зменшенню впливу людського фактора та підвищує надійність функціонування зерноочисних комплексів.

1.5. Аналіз сервісно-інженерних підходів

Ефективна робота пневмосепараторів зерна значною мірою залежить не лише від конструктивних особливостей обладнання, а й від правильно організованого сервісно-інженерного супроводу. У процесі експлуатації зерноочисні машини працюють у складних умовах: через робочі органи проходить значна кількість зернового матеріалу, пилу, легких і важких домішок, що спричиняє зношування деталей, забруднення повітряних каналів, порушення налаштувань і зміну режимів роботи. Саме тому діагностика, технічне обслуговування та предиктивний сервіс є важливими складовими підвищення ефективності пневмосепараторів.

Діагностика пневмосепараторів зерна передбачає визначення технічного стану машини та виявлення відхилень у її роботі. Основними параметрами, які контролюються під час діагностики, є продуктивність машини, швидкість повітряного потоку, частота обертання вентилятора, рівень втрат повноцінного зерна у відходи, ступінь очищення зернового матеріалу, вологість зерна та рівень засміченості. Своєчасне виявлення порушень у роботі обладнання дозволяє запобігти зниженню якості очищення та надмірним втратам зерна.

Таблиця 1.2 – Основні види діагностики пневмосепараторів зерна

Вид діагностики	Контрольовані параметри	Основна мета
Візуальна діагностика	Стан корпусу, з'єднань, заслінок, повітропроводів	Виявлення механічних пошкоджень та забруднень
Вібраційна діагностика	Вібрація вентилятора, приводу, підшипників	Виявлення дисбалансу та зношування вузлів
Аеродинамічна діагностика	Швидкість і тиск повітряного потоку	Контроль стабільності процесу сепарації
Електрична діагностика	Напруга, струм, частота обертання двигуна	Контроль роботи електропривода та автоматики

Вид діагностики	Контрольовані параметри	Основна мета
Акустична діагностика	Рівень шуму, параметри звукового сигналу	Визначення втрат зерна та контролю роботи системи
Комп'ютерна діагностика	Дані датчиків і контролерів	Моніторинг та аналіз роботи машини в реальному часі

Особливу увагу при діагностиці слід приділяти стану вентиляційної системи пневмосепаратора, оскільки саме повітряний потік забезпечує розділення зернової суміші за аеродинамічними властивостями. Недостатня швидкість повітря може призвести до неповного виділення легких домішок, а надмірна — до винесення повноцінного зерна у відходи. Тому контроль параметрів повітряного потоку є одним із головних напрямів сервісно-інженерного забезпечення роботи пневмосепаратора.

Важливим елементом діагностики є контроль технічного стану датчиків і виконавчих механізмів. До них належать датчики витрати зерна, вологості, засміченості, втрат зерна, положення заслінок, а також частотні перетворювачі, електроприводи та регульовальні механізми. Несправність або некоректна робота хоча б одного з цих елементів може спричинити помилки в роботі автоматизованої системи керування.

Технічне обслуговування пневмосепараторів спрямоване на підтримання обладнання у працездатному стані та запобігання передчасному зношуванню його вузлів. Воно включає очищення робочих каналів від пилу і залишків домішок, перевірку кріплень, огляд корпусних елементів, контроль стану вентилятора, перевірку електроприводів, регулювання заслінок і перевірку справності датчиків.

Таблиця 1.3 – Основні операції технічного обслуговування пневмосепаратора

Операція технічного обслуговування	Періодичність виконання	Призначення
Очищення пневмоканалів та осаджувальної камери	Щозміни	Запобігання засміченню та порушенню повітряного потоку
Перевірка кріплень вузлів і деталей	Щотижня	Зменшення ризику вібрацій і пошкоджень

Операція технічного обслуговування	Періодичність виконання	Призначення
Контроль стану вентилятора	Щомісяця	Забезпечення стабільної роботи повітряної системи
Перевірка роботи датчиків	Щомісяця	Забезпечення точності вимірювань
Калібрування вимірювальних систем	Періодично	Підвищення точності систем автоматизації
Перевірка електроприводів та ПЧ	Щоквартально	Підтримання стабільності режимів роботи
Змащування підшипникових вузлів	Відповідно до регламенту	Зменшення зношування деталей

Під час технічного обслуговування необхідно регулярно перевіряти герметичність повітряних каналів, оскільки підсмоктування повітря або витіки можуть порушувати стабільність пневмосепарації. Також важливим є очищення осаджувальних камер, бункерів і каналів для відведення відходів, адже накопичення пилу та домішок може зменшувати пропускну здатність машини й погіршувати якість очищення.

Сервісне обслуговування автоматизованих систем пневмосепаратора передбачає перевірку програмного забезпечення, калібрування датчиків, тестування роботи контролера, перевірку сигналів зворотного зв'язку та працездатності виконавчих механізмів. Особливо важливим є калібрування датчиків витрати зерна і втрат зерна, оскільки від точності їх показників залежить правильність автоматичного регулювання режимів роботи.\

Таблиця 1.4 – Основні датчики, що використовуються у системах автоматизації пневмосепараторів

Тип датчика	Контрольований параметр	Призначення
Датчик тиску	Перепад тиску повітря	Контроль роботи вентиляційної системи
Датчик швидкості повітря	Швидкість повітряного потоку	Регулювання режиму сепарації
Акустичний датчик	Втрати зерна у відходи	Контроль ефективності очищення

Тип датчика	Контрольований параметр	Призначення
Датчик вологості	Вологість зерна	Коригування режимів очищення
ТензOMETричний датчик	Продуктивність подачі зерна	Контроль пропускної здатності
Датчик положення	Положення заслінок	Контроль роботи виконавчих механізмів
Датчик частоти обертання	Частота обертання вентилятора	Контроль режиму роботи вентилятора

Предиктивний сервіс є сучасним напрямом технічного обслуговування, який ґрунтується на прогнозуванні можливих несправностей на основі аналізу поточних даних про роботу обладнання. На відміну від традиційного обслуговування за графіком, предиктивний підхід дозволяє виконувати ремонт або регулювання саме тоді, коли в цьому виникає реальна потреба.

У пневмосепараторах зерна предиктивний сервіс може базуватися на аналізі показників вібрації вентилятора, зміни частоти обертання, коливань продуктивності, зростання втрат зерна у відходи, зміни тиску або швидкості повітряного потоку. Якщо система фіксує відхилення параметрів від нормальних значень, це може свідчити про забруднення каналів, зношування підшипників вентилятора, порушення балансування, несправність заслінок або некоректну роботу датчиків.

Застосування предиктивного сервісу дозволяє зменшити кількість аварійних зупинок обладнання, оптимізувати витрати на ремонт, підвищити надійність роботи зерноочисного комплексу та продовжити термін експлуатації основних вузлів пневмосепаратора. Крім того, постійний моніторинг параметрів роботи машини дає змогу накопичувати інформацію для подальшого аналізу та вдосконалення режимів очищення зерна.

Таким чином, сервісно-інженерні підходи є важливою складовою підвищення ефективності пневмосепараторів зерна. Поєднання регулярної діагностики, якісного технічного обслуговування та предиктивного сервісу дозволяє забезпечити стабільність технологічного процесу, зменшити втрати

повноцінного зерна, підвищити якість очищення та забезпечити надійну роботу обладнання в умовах сучасного зернопереробного виробництва.

Висновки до розділу 1

У результаті аналізу сучасних досліджень і технічних рішень у сфері післязбиральної обробки зерна встановлено, що пневмосепаратори є важливими елементами зерноочисних комплексів та забезпечують ефективне видалення легких домішок із зернового матеріалу за рахунок використання аеродинамічних властивостей частинок.

Розглянуто призначення, принцип роботи та класифікацію пневмосепараторів зерна. Визначено, що ефективність процесу сепарації значною мірою залежить від швидкості повітряного потоку, фізико-механічних властивостей зернової суміші, рівномірності подачі матеріалу та стабільності режимів роботи вентиляційної системи.

Проаналізовано конструктивні особливості сучасних пневмосепараторів та встановлено, що найбільш перспективними є конструкції із замкненими повітряними системами, автоматичним регулюванням продуктивності та системами поточного контролю параметрів технологічного процесу. Використання таких систем дозволяє підвищити якість очищення зерна, зменшити втрати повноцінного зерна у відходи та забезпечити стабільність роботи обладнання.

У ході аналізу факторів, що впливають на ефективність сепарації, встановлено, що основними причинами нестабільності роботи зерноочисних машин є нерівномірність подачі зернового матеріалу, зміна вологості та засміченості зерна, коливання швидкості повітряного потоку, а також вплив людського фактора. Це обумовлює необхідність впровадження автоматизованих систем контролю та керування технологічним процесом очищення зерна.

Розглянуто сучасні системи автоматизації пневмосепараторів, до складу яких входять датчики контролю параметрів технологічного процесу,

програмовані логічні контролери, виконавчі механізми та SCADA-системи. Встановлено, що застосування акустичних, тензометричних, оптичних та інших типів датчиків дозволяє здійснювати оперативний контроль продуктивності, втрат зерна, швидкості повітряного потоку та засміченості зернового матеріалу.

Проаналізовано сервісно-інженерні підходи до підвищення ефективності роботи пневмосепараторів, зокрема методи діагностики, технічного обслуговування та предиктивного сервісу. Встановлено, що впровадження систем моніторингу технічного стану обладнання та автоматизованого контролю параметрів роботи дозволяє знизити ризик аварійних ситуацій, скоротити витрати на ремонт і технічне обслуговування, а також підвищити енергоефективність роботи зерноочисних машин.

Таким чином, проведений аналіз підтвердив доцільність використання сучасних систем контролю та автоматизації у пневмосепараторах зерна. Впровадження сервісно-інженерних методів керування технологічним процесом є перспективним напрямом підвищення ефективності післязбиральної обробки зерна, забезпечення стабільності роботи обладнання та покращення якісних показників очищення зернового матеріалу.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ.

2.1. Теоретичні основи пневмосепарації зерна

Функціонування пристрою поточного контролю і керування технологічним процесом пневмосепаратора відбувається наступним чином. Повітряний потік, який створюється вентилятором, циркулює в замкненому просторі між стінками пневмосепараційного каналу та осадової камери. Зерновий ворох подається із завантажувального бункера через зернопровід на розподільний конус, з якого, рівномірно розподіляючись, потрапляє в кільцевий пневмосепараційний канал. У цьому каналі під дією повітряного потоку з зернової суміші виділяються легкі домішки, які направляються в осадову камеру. Якщо швидкість повітряного потоку перевищує швидкість витання зернівок очищеної культури, це призводить до винесення разом із домішками і повноцінного зерна. Зернівка, взаємодіючи з лопатками колеса вентилятора, прискорюється, набуває значної кінетичної енергії і, вдаряючись об обвід корпусу осадової камери, створює звуковий сигнал 105. Акустичний датчик, розташований із зворотного боку стінки осадової камери, перетворює енергію удару на електричний сигнал. Для вимірювання подачі зерна в конусному дільнику встановлено тензометричний витратомір. Відповідно до заданого алгоритму, пристрій на основі сигналів датчиків здійснює коригування частоти обертання колеса вентилятора за допомогою перетворювача частоти (ПЧ) напруги живлення електродвигуна.

Зернівка очищеної культури, яка разом із легкими домішками виноситься у верхню частину пневмосепараційного каналу, захоплюється лопаттю колеса вентилятора 2 (рис. 2.3). Переміщуючись уздовж лопаті, вона прискорюється і після сходу з неї вдаряється об стінку осадової камери 4. 105 Рух зернівки по криволінійній лопаті, загнутій назад, описується такою закономірністю:

$$m\ddot{s} = mr\omega_B^2 \sin\beta - f_{TP} \left(2m\omega_B \dot{s} - r\omega_B^2 m \cos\beta \right), \quad (2.5)$$

де m – маса зернівки;

s – переміщення зернівки по дузі лопаті 1-2 (рис. 2.4);

r – відстань від осі колеса вентилятора до зернівки;

ω – кутова швидкість колеса вентилятора;

β – кут нахилу лопаті в точці знаходження зернівки;

f_{TP} – коефіцієнт тертя зернівки по поверхні лопаті.

Після перетворення вираз (2.5) зводиться до вигляду:

$$\ddot{s} = r\omega_B^2 \sin\beta - f_{TP} \left(2\omega_B \dot{s} - r\omega_B^2 \cos\beta \right). \quad (2.6)$$

Відомо, що дане диференціальне рівняння не має точного аналітичного розв'язку [14]. Для розв'язання рівняння (2.6) використаємо чисельний метод Рунге-Кутта [138]. Позначивши $V = \dot{s}$, отримуємо систему рівнянь:

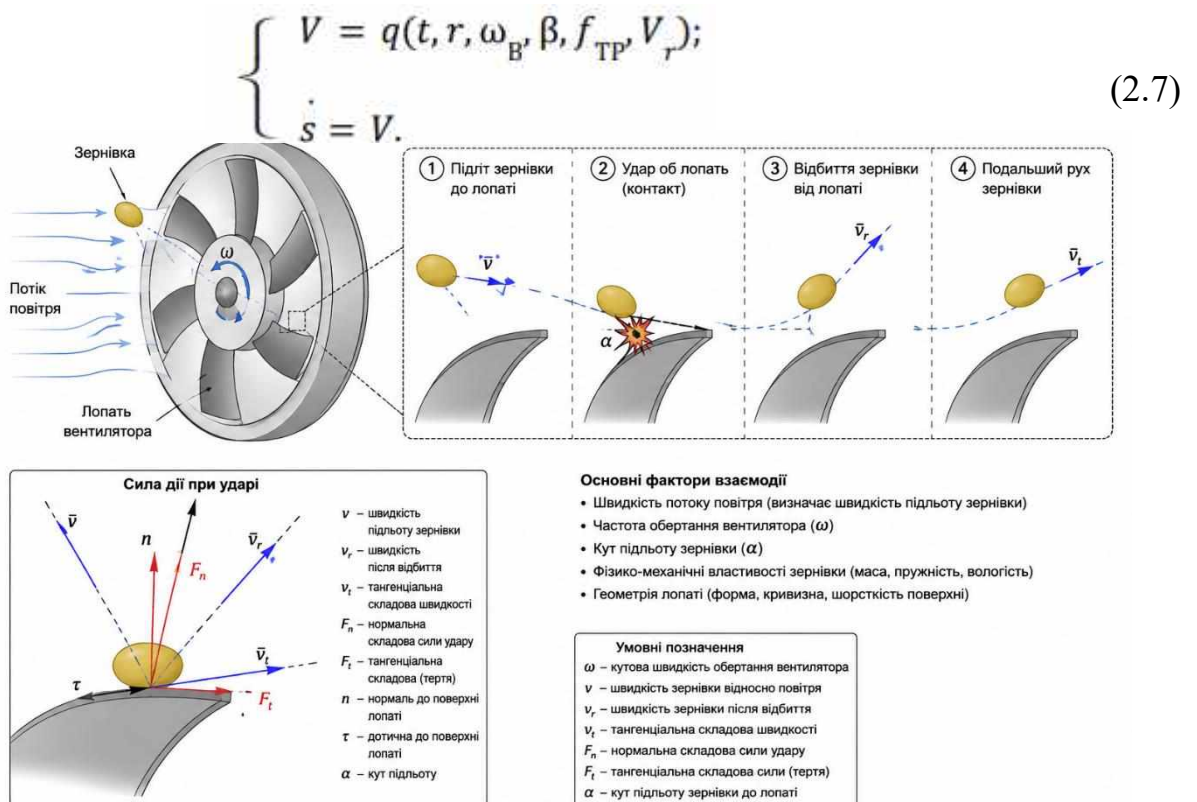


Рисунок 2.1 – Схема взаємодії зернівки з лопаттю вентилятора

Початковими умовами розв'язання системи рівнянь (2.7) є:

$$t(0) = 0; r(0) = r_1; \beta(0) = \beta_1; V(0) = Vr_1,$$

де r_1 – радіус встановлення внутрішньої кромки лопаті на колесі (точка 1);

β_1 – кут нахилу лопаті в точці 1;

V_{r1} – радіальна складова абсолютної швидкості зернівки в точці..

Відповідно до допустимої похибки обираємо крок $\Delta t = 0,0001$ с. Параметр $t_i = i \Delta t$. Для функцій V_i і s_i знаходимо прирости ΔV_i і Δs_i . Значення приростів обчислюємо, використовуючи відомі формули. Наступні значення V_{i+1} і s_{i+1} визначаємо за виразами:

$$\begin{cases} V_{i+1} = V_i + \Delta V_i \\ s_{i+1} = s_i + \Delta s_i \end{cases} \quad (2.8)$$

Визначимо значення початкових умов. Для проведення експериментальних досліджень плануємо використовувати пневмосепаратор [47]. Радіус встановлення внутрішньої кромки 1 лопаті колеса вентилятора $r_1 = 0,225$ м. Кут встановлення лопаті на внутрішньому колі колеса $\beta_1 = 40^\circ$. Кутова швидкість колеса $\omega_B = 90$ рад/с. Коефіцієнт тертя зернівок по сталевих лопатях знаходиться в межах $f_{TP} = 0,25 \dots 0,33$ [119]. Приймаємо в розрахунках $f = 0,29$. Відносну швидкість у початковий момент визначимо, виходячи з абсолютної швидкості зернівки в момент входження її в міжлопатеві канали. Оскільки разом із домішками виносяться зернівки, швидкість витання яких мало відрізняється від робочої швидкості повітря в пневмосепарувальному каналі, абсолютна швидкість зернівок є незначною. Тому в момент входження в міжлопатеві канали в розрахунках можемо прийняти значення абсолютної швидкості зернівки $V_a = 0$. У момент контакту з кромкою 1 лопаті зернівка набуває відносної швидкості:

$$V(0) = V_e(0) \cos \beta_1. \quad (2.9)$$

Тут $V_e(0)$ – колова швидкість кромки 1 лопаті, що визначається за виразом:

$$(2.10)$$

Переміщення зернівки $V_e(0) = \omega_B r_1$ напрямку (рис. 2.5) визначимо за виразом [23]:

$$r_{r+1} = \sqrt{r_i^2 + \Delta s_i^2 - 2r_i \Delta s_i \cos\left(\frac{\pi}{2} - \beta_i\right)}. \quad (2.11)$$

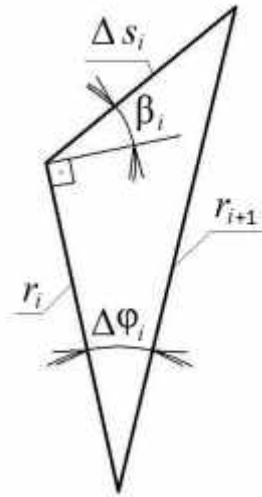


Рисунок 2.2 – До розрахунку параметрів переміщення зернівки по лопаті колеса вентилятора

Значення кута нахилу лопаті визначимо, використовуючи вираз 2.11 для обчислення параметрів лопатей колеса вентилятора, встановленого в пневмосепараторі:

$$r_i = r_1 \exp \exp [\varphi \operatorname{tg}(\beta_1 + k\varphi)], \quad (2.12)$$

де φ – кут розвороту спіралі лопаті;

k – коефіцієнт, що залежить від кута β_2 встановлення лопаті на зовнішньому радіусі колеса.

Поточний кут розвороту спіралі:

$$\varphi_{i+1} = \varphi_i + \Delta\varphi_i \quad (2.13)$$

Приріст кута $\Delta\varphi_i$ розвороту спіралі лопаті визначаємо за формулою [23]:

$$\Delta\varphi_i = \arccos \frac{r_i^2 + r_{i+1}^2 - \Delta s_i^2}{2r_i r_{i+1}}. \quad (2.14)$$

Абсолютну швидкість зернівки при переміщенні по лопаті визначимо за виразом [81]:

$$V_{ai} = \sqrt{V_{ei}^2 + V_i^2 - 2V_{ei}V_i \cos\beta_i} \quad (2.15)$$

Кут ψ , що характеризує напрямок вектора абсолютної швидкості частинки (рис. 2.4), розраховуємо, використовуючи теорему синусів:

$$\psi_i = \arcsin\left(\frac{V_i}{V_{ai}} \sin\beta_i\right). \quad (2.16)$$

Розрахунки завершуємо в момент сходження зернівки з лопаті при $r_1 = r_2 = 0,3$ м. Результати розрахунків наведені в додатку Б. Зернівка сходить з лопаті в момент часу $t = 0,0075$ с з абсолютною швидкістю $V_a = 12,4$ м/с. Напрямок вектора абсолютної швидкості характеризується кутом $\psi = 48,4^\circ$.

2.2. Математичне моделювання процесу сепарації

Будь-яка повітряна система ЗОМ функціонує в умовах змінних зовнішніх збурень, що зумовлені численними та різноманітними чинниками. Як було зазначено у розділі 1, до них відносяться нестабільність подачі зерна в ЗОМ, коливання вологості, засміченості та фізико-механічних властивостей зерна. Вплив цих факторів відображається на технологічному процесі повітряної системи, зокрема на ефективності виділення домішок і рівні втрат зерна у відходи. Для регулювання зазначених вихідних параметрів з метою досягнення оптимального режиму роботи пневмосистем за умов дії зовнішніх збурень необхідно здійснювати коригування процесу сепарації зерна. Як було зазначено раніше, це досягається переважно шляхом регулювання швидкості повітряного потоку в зоні пневмосепарації. Така корекція виступає керуючим впливом на машину.

Отже, роботу будь-якої повітряної системи доцільно розглядати як реакцію на зовнішні збурення на вході та керуючі впливи. При цьому саму машину можна представити у вигляді схеми, побудованої за принципом «вхід–вихід». Такий підхід до опису функціонування пневмосистеми дає підстави розглядати її як динамічну систему. На рисунку 2.1 наведено блок-схему пневмосепаратора зерна як динамічної системи.

Зовнішні збурювальні впливи F подані у вигляді несталості подачі матеріалу в пневмосепаратор та змін його якісних характеристик. У результаті повітряного розділення зерна формуються вихідні показники Y , до яких належать кількість очищеного зерна з відповідними якісними параметрами, виділені домішки та втрати зерна у відходи. Керуючий вплив U реалізується через зміну швидкості повітряного потоку в пневмосепараційному каналі, що визначає режим роботи машини.

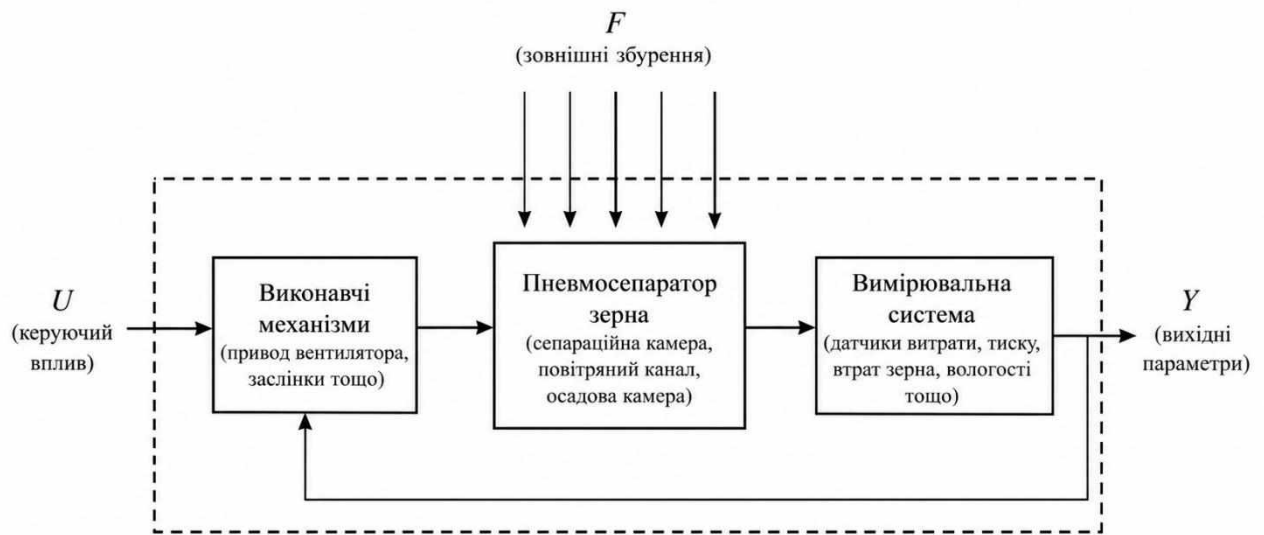


Рисунок 2.3 - Блок-схема пневмосепаратора зерна: вектор F - зовнішні збурення, вектор U - керуючий вплив, вектор Y - вихідні параметри

Критерієм вибору оптимального режиму функціонування повітряних систем зерноочисних машин є ефективність відокремлення домішок і величина втрат зерна у відходи. Ці показники визначаються швидкістю повітря V у зоні пневмосепарації зернового матеріалу. Розрахункове оптимальне значення швидкості встановлюється за виразом:

$$V_p = m_V - \alpha \sigma_V, \text{ м/с}, \quad (2.1)$$

де m_V – математичне очікування швидкості витання зернівок очищеної культури, м/с;

σ_V – середньоквадратичне відхилення швидкості витання зернівок очищеної культури, м/с;

α – коефіцієнт, що враховує допустимий рівень втрат зерна у відходи під час очищення.

За оптимальної швидкості повітря забезпечується максимально можливе відокремлення домішок при допустимих втратах зерна. Нестійкість подачі зерна на очищення спричиняє зміну опору зернового шару в пневмосепараційному каналі, що, у свою чергу, призводить до коливань фактичної швидкості повітря в зоні сепарації. Одночасно можуть змінюватися фізико-механічні

характеристики зерна, яке надходить на обробку, що обумовлює необхідність коригування розрахункового значення швидкості. Таким чином, ручне регулювання не дозволяє забезпечити відповідність між розрахунковою і фактичною швидкістю повітря.

Функція неузгодженості швидкостей повітря визначається:

$$\varepsilon_v(t) = V(t) - V_p(t). \quad (2.2)$$

При $\varepsilon_v(t) > 0$ втрати зерна перевищуватимуть встановлений допустимий показник, а при $\varepsilon_v(t) < 0$ – втрати зерна зменшуються, але одночасно знижується ефективність очищення. Тому раціональним буде підтримання $\varepsilon_v(t) = 0$. Для обчислення $\varepsilon_v(t)$ необхідно знати зазначені швидкості $V(t)$ і $V_p(t)$. Швидкість $V(t)$ можна виміряти за допомогою анемометрів, датчиків динамічного тиску, трубки Піто–Прандтля, що не становить складності. Для визначення значень m_v і σ_v потрібне дороговартісне обладнання та додатковий час на виконання вимірювань і проведення розрахунків. Отже, визначити поточне значення $\varepsilon_v(t)$ є досить складно.

Контролювати технологічний процес пневмосепарації зерна можливо за непрямыми показниками. Як було зазначено вище, при $\varepsilon_v(t) \neq 0$ відбувається відхилення втрат зерна $B_3(t)$ у відходи від допустимого значення. Тому як функцію розузгодження доцільно, на наш погляд, використовувати відхилення фактичних втрат зерна від допустимих:

$$\varepsilon(t) = B_3(t) - B_d, \% \quad (2.3)$$

де B_3 – відносні втрати повноцінного зерна у відходи в поточний момент часу, %;

B_d – допустимі відносні втрати повноцінного зерна у відходи, %.

Допустиме значення відносних втрат зерна B встановлюється агрономічною службою господарства відповідно до агротехнічних вимог до ЗОМ або конкретних завдань зерноочищення. Фактичні відносні втрати зерна визначаються за виразом:

$$B_3(t) = \frac{q_3(t)}{G_{30}(t)} 100, \% \quad (2.4)$$

де $q_3(t)$ – абсолютні втрати зерна в поточний момент часу, т/год;

$G_{3_0}(t)$ – подача зерна на очищення в поточний момент часу, т/год.

На основі досліджень [24, 32] сформовано модель функціонування пневмосепаратора зерна з пристроєм поточного контролю і керування технологічним процесом даної машини (рис. 2.2). Ця модель включає пневмосепаратор (повітряну систему) та пристрій керування 1 (обведено пунктирною лінією у вигляді прямокутника). Пневмосепаратор можна поділити на три блоки: вентилятор, пневмосепарувальний канал і осаджувальна камера. Розглянемо ці елементи у взаємозв'язку з вхідними та вихідними параметрами. До вхідних збурювальних параметрів пневмосепарувального каналу належать подача зернового матеріалу $G_{3_0}(t)$ та його якість $K_{3_0}(t)$ (швидкість витання, засміченість, вологість тощо). Вихідними параметрами є маса очищеного зернового матеріалу $G_{3_1}(t)$, його якість $K_{3_1}(t)$, а також маса відходів $\Pi_1(t)$, що видаляються через приймач відходів, і абсолютні втрати повноцінного зерна $q_3(t)$.

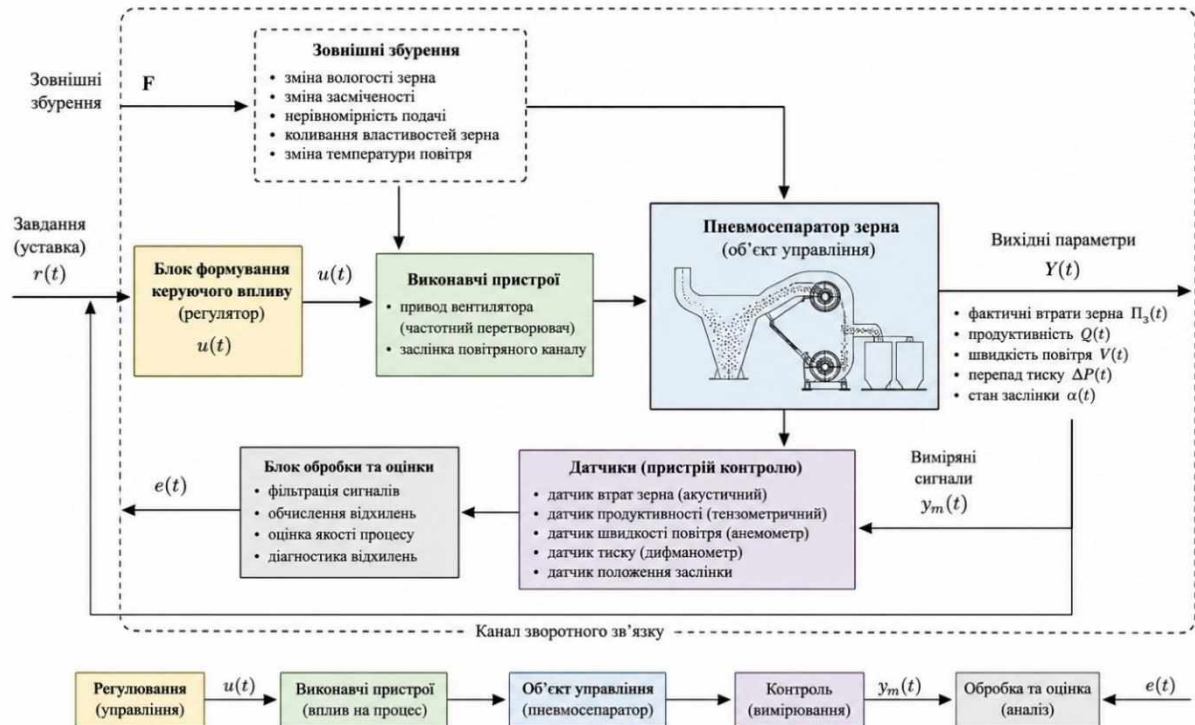


Рисунок 2.4 – Структурна модель функціонування пневмосепаратора з системою контролю та керування

На рисунку 2.2 представлено модель функціонування пневмосепаратора зерна з пристроєм поточного контролю та управління технологічним процесом. Модель відображає взаємозв'язок між основними елементами системи автоматизованого керування, а також вплив зовнішніх факторів на роботу пневмосепаратора.

Основним об'єктом управління є пневмосепаратор зерна, у якому відбувається процес розділення зернового матеріалу за аеродинамічними властивостями частинок. На роботу пневмосепаратора впливають зовнішні збурення F , до яких належать зміна вологості та засміченості зерна, нерівномірність подачі матеріалу, коливання фізико-механічних властивостей зернової суміші, а також зміна температури повітря.

Керування процесом здійснюється за допомогою блоку формування керуючого впливу (регулятора), який формує сигнал $u(t)$ відповідно до заданих параметрів $r(t)$. Сформований керуючий сигнал надходить до виконавчих пристроїв, що забезпечують зміну режимів роботи пневмосепаратора. До таких пристроїв належать привід вентилятора з частотним перетворювачем та механізми регулювання повітряного каналу.

У процесі роботи пневмосепаратора формуються вихідні параметри $Y(t)$, які характеризують ефективність технологічного процесу. До них належать фактичні втрати зерна у відходи $P_z(t)$, продуктивність $Q(t)$, швидкість повітряного потоку $V(t)$, перепад тиску $\Delta P(t)$ та положення регулювальної заслінки $\alpha(t)$.

Контроль параметрів технологічного процесу здійснюється системою датчиків. Для вимірювання втрат зерна використовується акустичний датчик, продуктивність визначається за допомогою тензометричного датчика, швидкість повітряного потоку контролюється анемометром, перепад тиску – дифманометром, а положення заслінки – відповідним датчиком положення. Отримані виміряні сигнали $u_m(t)$ передаються до блоку обробки та оцінки інформації.

У блоці обробки виконується фільтрація сигналів, обчислення відхилень параметрів від заданих значень, оцінювання якості процесу сепарації та

діагностика можливих відхилень у роботі системи. За результатами аналізу формується сигнал похибки $e(t)$, який через канал зворотного зв'язку надходить до регулятора для коригування режимів роботи пневмосепаратора.

Таким чином, представлена модель забезпечує реалізацію замкненої системи автоматичного керування, що дозволяє підтримувати стабільні параметри технологічного процесу, зменшувати втрати повноцінного зерна у відходи та підвищувати ефективність очищення зернового матеріалу.

Схема реалізації розробленої моделі функціонування наведена на рисунку 2.3.

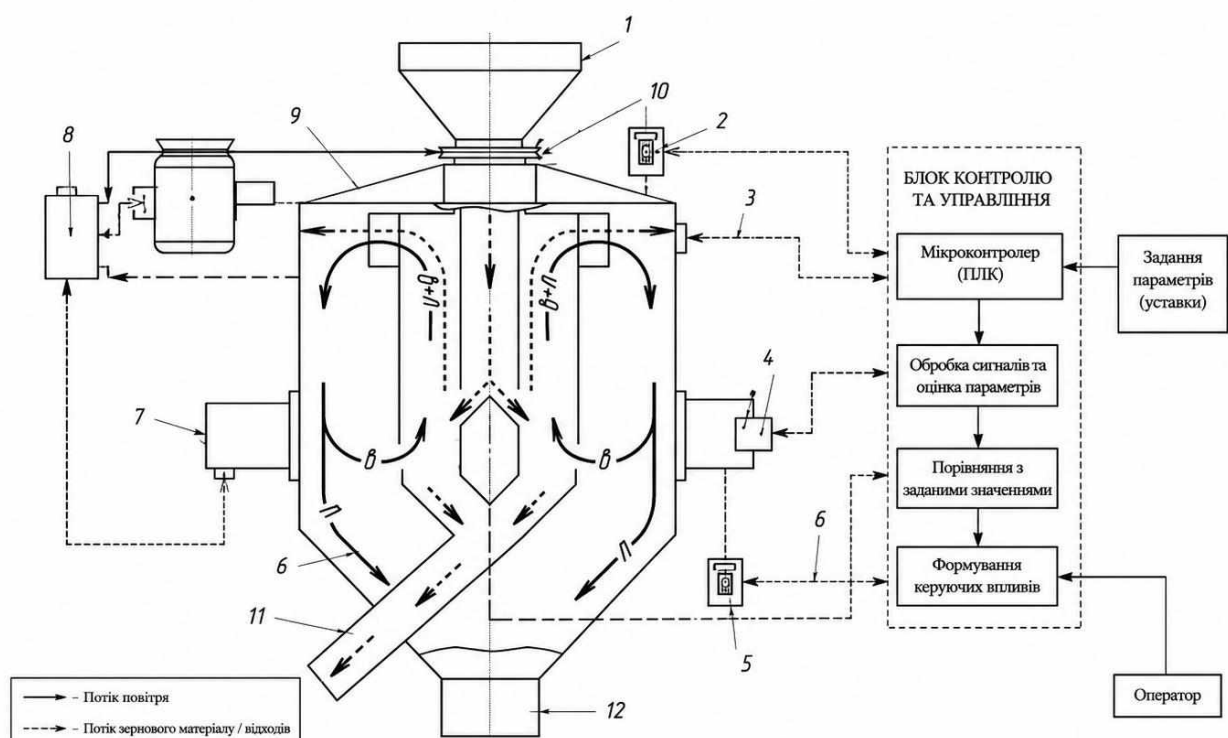


Рисунок 2.5 - Схема пристрою поточного контролю і управління технологічним процесом пневмосепаратора: 1- завантажувальний пристрій; 2 – радіальний вентилятор; 3 - акустичний датчик; 4 - кільцева осадова камера; 5 - базовий блок пристрою управління; 6 - конусний дільник з витратоміром зерна; 7 - перетворювач частоти; 8 - кільцевий пневмосепарувальний канал; 9 – приводний електродвигун; 10 – фотодатчик тахметра; 11 – приймач очищеного зерна; 12 – приймач легких домішок; 13 - зернопровід

2.3. Обґрунтування параметрів ефективної роботи

Результатом співударяння зернівки, що сходить з лопаті вентилятора, зі стінкою осадової камери є виникнення акустичного фону, який сприймається у вигляді клацання. Для удару притаманні дві характерні особливості: короткочасність цього процесу, упродовж якого відбуваються різкі зміни швидкостей точок механічної системи, а також поява і зникнення значних ударних сил. У зв'язку з малою тривалістю удару достатньо враховувати лише імпульс ударних сил, нехтуючи імпульсами всіх інших сил. Таким чином, імпульс ударної сили може бути поданий виразом [40, 60, 80]:

$$S = \int_t^{t+\tau} F(t)dt = F_{\text{сп}}^{\text{уд}} \tau = (m_a V_{a1} - m_a V_{a0})/1000000, \text{ Н}\cdot\text{с}, \quad (2.17)$$

де V_{a0} – швидкість зернівки на початку удару; $V_{a0} = 12,41$ м/с;

V_{a1} – швидкість зернівки в кінці удару, м/с;

τ – тривалість імпульсу, с;

F – ударна сила, Н;

$F_{\text{сп}}^{\text{уд}}$ – середнє значення ударної сили, Н;

m_a – абсолютна маса зерна пшениці; $m_a = 40$ г.

Відомо, що будь-яка зернівка злакової культури має коефіцієнт відновлення $k_y < 1$. Отже, при ударі зернівка втрачатиме швидкість, а формула імпульсу сили матиме такий вигляд:

$$S = (m_a V_{a1}(k_y - 1) - m_a V_{a0}(k_y + 1))/1000000; \quad (2.18)$$

$$k_y = \frac{V_{a1}}{V_{a0}}. \quad (2.19)$$

З виразів (2.17) і (2.18) видно, що імпульс сили удару залежить від маси m зернової частинки та тривалості τ удару, за яку відбувається кінцева зміна швидкості зернівки і її кількості руху, а також від коефіцієнта відновлення k_y . Коефіцієнт відновлення характеризує властивості зернівки та стінки: пружність, пластичність, співвідношення мас тіл, що стикаються, вологість, шорсткість та

інші особливості. Наприклад, відомо, що для зерен пшениці, жита, ячменю $k_y = 0,6$ [25, 141], а для частинок соломи $k_y = 0,2$ [35], що відповідає, у першому випадку, недосконало пружному, а в інших – непружному удару. Отже, ударний імпульс зіткнення зерен буде вищим, ніж у частинок соломи. Враховуючи також, що маса зернівок перевищує масу частинок домішок, впливом домішок на параметри сигналу акустичного датчика можна знехтувати.

Також коефіцієнт k_y визначає втрату кінетичної енергії під час удару [60]. Для пояснення цього явища виразимо процес зіткнення зернівки зі стінкою через закон збереження механічної енергії, згідно з яким сума кінетичної та потенціальної енергій є сталою [64, 129].

Розглянемо зіткнення зернівки, що рухається з кінетичною енергією E_{k0} і швидкістю V_{a0} (рис. 2.6, а), з нерухомою жорсткою стінкою, маса якої значно перевищує масу зернівки. Рух зернівки вважаємо поступальним, а удар – прямим і частково пружним. У даному процесі розрізняють дві стадії.

Протягом першої стадії з моменту дотику зернівки до стінки швидкості точок першої зменшуються до нуля. Зернівка деформується, а її початкова кінетична енергія переходить у внутрішню потенціальну енергію деформованого тіла (рис. 2.6, б). Деформація зернівки відбувається внаслідок появи поздовжньої хвилі (хвилі стиску), яка поширюється всередині зернівки від точки удару в протилежний бік. Коли хвиля досягне протилежного боку зернівки, зернова частинка в цей момент буде подібною до невагомої стиснутої пружини з її потенціальною енергією:

(2.20)

де F_y – сила пружності $E_{п1} = F_y \cdot \Delta l$,

Δl – деформація [155].

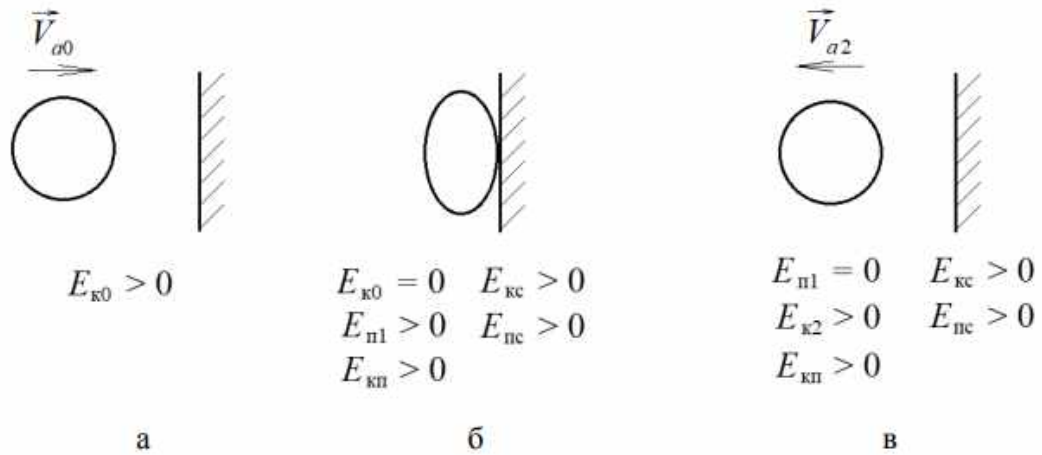


Рисунок 2.6 - Співударання зернівки з нерухомою жорсткою стінкою

На другій стадії хвиля стиску в зернівці повертається назад до точки удару, і зернівка відновлює свою форму. Тобто наприкінці удару її потенціальна енергія переходить у кінетичну енергію частинки E_{K2} , і зернівка починає рухатися зі швидкістю V_{a2} (рис. 2.6, в). Однак при цьому має місце втрата кінетичної енергії зернівки $E_{KП}$, що обумовлюється тим, що $V_{a2} < V_{a0}$, або $ky < 1$. Частина енергії витрачається на нагрівання зернівки, утворення в ній залишкових деформацій тощо.

Зернівка так чи інакше впливає на стінку осаджувальної камери. У цьому випадку відбувається її мікропереміщення у напрямку від зернівки (стінка набуває затухаючих коливань), а також стискання стінки, як і у випадку із зернівкою. Тому додамо ще два параметри: кінетичну енергію $E_{КС}$ стінки та втрати кінетичної енергії $E_{ПС}$ у ній. Отже,

$$E_{K0} = E_{П1} + E_{КС} + E_{ПС}$$

Кінетична енергія стінки осадової камери зумовлює виникнення її власних (резонансних) коливань, а також поширення поздовжніх (переважно), поперечних, поверхневих, згинальних та інших хвиль. Коливання стінки та хвилі, що в ній розповсюджуються, є джерелом звукових коливань.

Отже, отримаємо вираз:

$$E_{K0} = E_{П1} + E_{ПС} + E_{КС} = E_{K2} + E_{КП} + E_{ПС} + E_{КС}' \quad (2.21)$$

де $E_{к0} = \frac{mV_{a0}^2}{2}$ – кінетична енергія зернівки до зіткнення;

$E_{к0} = \frac{mV_{a0}^2}{2}$ – кінетична енергія зернівки в момент відскоку від стінки.

Чим більший коефіцієнт відновлення k_y , тим більшою є кінетична енергія не лише зернівки після зіткнення $E_{к2}$, але й стінки $E_{кС}$, що сприймає удар від зернівки [11]. Це, своєю чергою, впливатиме на амплітуду мікроколиваний стінки у бік її збільшення. При такому значенні k_y втрати кінетичної енергії в зернівці $E_{кП}$ будуть меншими [15]. Можна припустити, що втрати кінетичної енергії стінки $E_{пС}$ залишатимуться незмінними у зв'язку зі сталістю коефіцієнта відновлення матеріалу стінки.

Як було зазначено вище, удар зернівки по металевій стінці спричиняє не лише її коливання, а й поширення всередині стінки поздовжніх та інших звукових хвиль, які мають швидкість звуку матеріалу. Однак, оскільки удар відбувається не по стрижню, поширенням хвиль можна знехтувати [26, 28].

Отже, можна зробити висновок, що удар із меншою тривалістю збуджує вищі значення власних частот механічної системи, якою в даному випадку є металева стінка осадової камери пневмосепаратора.

З метою збереження габаритів пневмосепаратора тензометричний витратомір зерна доцільно інтегрувати в конусний дільник потоку очищеного матеріалу. При цьому поверхнею, що сприймає зерно, є конус 2 з певним кутом нахилу α_k (рис. 2.13). Зернівка 1 починає надходити на конусний дільник зі швидкістю $V_{30} = 0$ м/с з висоти H бункера. У результаті цього зернівка, розігнавшись до швидкості V_{31} , ударяється об дільник. Швидкість зернівки після відскоку V_{32} залежить від коефіцієнта відновлення k_y .

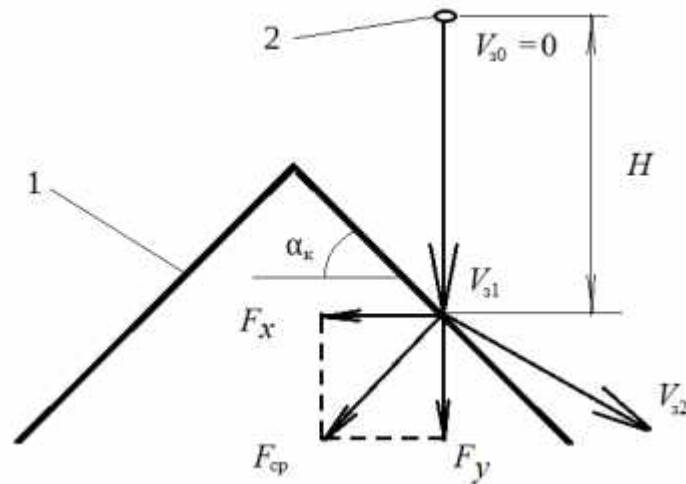


Рисунок 2.7 - Визначення зусилля на конусі витратоміра зерна

За основу візьмемо середню ударну силу, наведену у виразі (2.18), та коефіцієнт заповнення γ з виразу (2.33).

Подача зерна в пневмосепаратор визначається як кількість зерен n з певною масою кожного за одиницю часу або період T :

Подача зерна в пневмосепаратор визначається як кількість зернівок з деякою масою кожна за одиницю часу або період T :

$$\frac{n}{T} = \frac{G_{30}}{m_a \cdot 10^{-3} \cdot 3,6}, \quad (2.35)$$

де T – період, с;

G_{30} – подача зерна в пневмосепаратор, т/год;

m_a – абсолютна маса зерна пшениці, г.

З урахуванням того, що поточний час складається з періодів T , коефіцієнт заповнення буде дорівнювати 1 за умови, що ударні імпульси з тривалістю повністю заповняють період T :

$$\gamma = \frac{n\tau}{T} = 1. \quad (2.36)$$

Однак у нашому випадку γ може бути більшим за «1» через одночасне зіткнення з конусом кількох зернівок, у результаті чого амплітуди імпульсів підсумовуються, а n стає більшим. Тоді коефіцієнт заповнення з урахуванням (2.35) визначиться:

$$\gamma = \frac{n\tau}{T} = \frac{G_{30} \cdot T \cdot \tau}{m_a \cdot 10^{-3} \cdot 3,6 \cdot T} = \frac{G_{30} \cdot \tau}{m_a \cdot 10^{-3} \cdot 3,6} \quad (2.37)$$

Швидкість зернівки в момент удару з урахуванням висоти вільного падіння та відсутності початкової швидкості визначається:

$$V_{31} = \sqrt{2gH}. \quad (2.38)$$

Зернівка вдаряється об розподільний конус, розташований під кутом $\alpha_k = 45^\circ$. До того ж тензодатчик сприймає лише вертикальну силу F_y . Тоді за аналогією з ударом зернівки об стінку осаджувальної камери згідно з виразами (2.17) і (2.18) з урахуванням перетворень вертикальна сила на конус вирається:

$$F_y = |\gamma \cdot F_{cp}| \cos^2 \alpha_k = \left| \frac{\gamma \cdot S}{\tau} \right| \cos^2 \alpha_k = \left| \frac{G_{30} \cdot \sqrt{2gH} (k_y^2 - 2k_y - 1)}{3,6} \right| \cos^2 \alpha_k, \quad (2.39)$$

Графічні результати розрахунку наведені на Рисунку 2.14, де очевидна лінійна залежність вертикальної сили тиску зерна на конус витратоміра від подачі зернового матеріалу. Також на силу впливає коефіцієнт відновлення, що характеризує фізико-механічні властивості зерна.

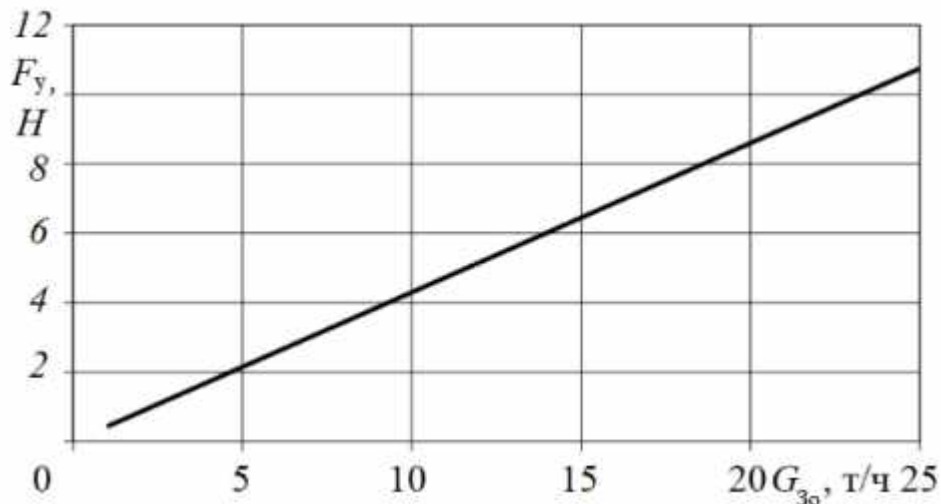


Рисунок 2.8 - Залежність зусилля на конусі витратоміра від подачі зернового матеріалу

У результаті розрахунків визначено номінальне зусилля на тензOMETричній балці 20 Н. Такі тензOMETричні датчики з електронним модулем присутні у побутових вагах з відповідним діапазоном вимірювання.

Характеристики вентилятора та повітряної системи (мережі) можна подати графічно (рис. 2.15). Витрата повітря, створювана вентилятором, визначається точкою А перетину характеристик вентилятора $P_v = f(Q)$ та мережі $\Delta P_c = \psi(Q)$. У цій точці, яку називають $\Delta P_c = K_c \cdot Q^2$, Па/г, повний тиск вентилятора P_v дорівнює гідравлічним втратам тиску в повітряній системі ΔP_c . Гідравлічні втрати тиску визначаються виразом:

$$(2.40)$$

де K_c - коефіцієнт опору системи;

Q – витрата повітря в системі, м³/с.

Отже, у точці рівноваги [12, 122]:

$$P_v = \Delta P_c = K_c \cdot Q_p^2, \quad (2.41)$$

де Q_p - витрата повітря, що відповідає точці рівноваги, м³/с.

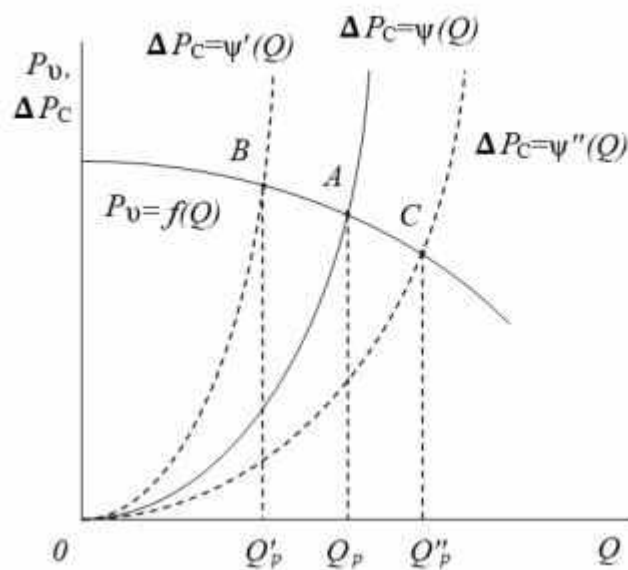


Рисунок 2.9 – Характеристики вентилятора і мережі

Відмінною особливістю функціонування повітряної системи зерно- або насінноочисних машин є постійна зміна коефіцієнта K_c опору мережі у зв'язку з різними факторами. Цими факторами є такі: нестабільність фізико-механічних властивостей і подачі зернового матеріалу в пневмосепарувальний канал. Так, при збільшенні вологості знижується пропускна здатність зерноочисних машин [63, 77], точніше доводиться зменшувати подачу зернового матеріалу для збереження якості очищення. Опосередковано можна зазначити, що підвищена

вологість зерна чинить більший опір повітряному потоку і ефективність очищення машиною знижується.

Також на коефіцієнт опору мережі впливає відсоткове співвідношення домішок у зерновому матеріалі, різноманітність домішок і їх кількісний склад. Збільшення відсоткового вмісту домішок у матеріалі, як і у випадку з вологістю, знижує ефективність очищення зерна від домішок. Це призводить до необхідності примусового зниження подачі зерна в машину для збереження необхідної якості обробки [63, 78].

Коефіцієнт опору мережі K_C складається з коефіцієнта опору мережі K_{CO} за відсутності подачі зернового матеріалу і коефіцієнта опору зернового шару K_{C3} [48]:

$$K_C = K_{CO} + K_{C3} = \frac{P_u}{Q^2}. \quad (2.42)$$

Припустимо, що в даний момент $\Delta P_c = \psi'(Q)$ ної системи відносні втрати зерна у відходи мають максимально допустиме значення, що відповідає критерію оптимального режиму роботи системи. Підвищення подачі зернового матеріалу (або зміна його якісної характеристики у відповідному напрямку) в пневмосепарувальний канал збільшить коефіцієнт K_{C3} . Гідравлічні втрати зростуть, зменшиться витрата повітря, тобто графік опору мережі зміститься вліво до точки В (крива на Рисунок 2.13).

Швидкість повітряного потоку в зоні сепарації залежить від витрати повітря [21, 127]:

$$V = \frac{Q}{F_k}, \quad (2.43)$$

де Q – витрата повітря, що генерується вентилятором, m^3/c ;

F_k – площа поперечного перерізу пневмосепарувального каналу, m^2 .

Отже, зі збільшенням опору зернового шару зменшуватиметься швидкість повітря в пневмосепарувальному каналі. Це, своєю чергою, погіршить повноту виділення домішок. Зниження подачі зернового матеріалу призведе до зворотного ефекту, і характеристика мережі зміститься тепер праворуч до точки С (крива $\Delta P_c = \psi''(Q)$). Результатом цього стане зростання швидкості повітря в зоні пневмосепарації та недопустимі втрати повноцінного зерна у відходи.

Продиференціювавши вираз (2.42), отримаємо таке:

$$\frac{dQ}{QdK_{c3}} = - \frac{Q}{\frac{2P_v}{Q} - \frac{dP_v}{dQ}}, \quad (2.42)$$

де $\frac{dQ}{QdK_{c3}}$ – коефіцієнт відносної нестабільності потоку повітря при зміні опору мережі, викликаного нерівномірною подачею зернового матеріалу;

K_{c3} – коефіцієнт опору зернового шару [48].

Діапазон зміни опору системи ((K_{c3})) пропорційний коефіцієнту відносної нестабільності повітряного потоку $\frac{dQ}{QdK_{c3}}$

Для зменшення значення цього коефіцієнта існують різні методи, які розглянуті нижче [48].

1) Аналіз виразу (2.43) показує, що коефіцієнт $\frac{dQ}{QdK_{c3}}$ зменшується зі зростанням тиску P_v , що створюється вентилятором.

2) Також цей коефіцієнт можна знизити, зменшивши величину $\frac{dP_v}{dQ}$. Ця величина свідчить про те, що характеристика вентилятора на робочих режимах повинна бути, у кращому випадку, круто спадною.

Реалізувати все це можна застосуванням дросельних заслінок у повітропідвідних каналах пневмосистеми. По-перше, зміна опору мережі компенсується заслінкою. По-друге, при створенні підвищеного тиску повітряною заслінкою зміна витрати зерна буде менше впливати, оскільки зміна тиску буде менш суттєвою відносно середнього тиску. Однак відомо, що потужність, споживана вентилятором, дорівнює [21, 116, 122]:

$$N = \frac{P_v \cdot Q}{\eta_B}, \quad (2.45)$$

де η_B – ККД вентилятора.

Отже, зростання створюваного тиску неминуче призведе до збільшення споживаної потужності. Тобто метод дроселювання є неекономічним [7, 139].

3) Доцільно коригувати аеродинамічну характеристику вентилятора зміною частоти обертання колеса вентилятора.

Це впливає з таких співвідношень, справедливих для вентилятора певної конструкції, що працює в заданому режимі та переміщує повітря з постійною густиною:

$$\frac{Q}{n} = \text{const}; \quad (2.46)$$

$$\frac{P_v}{n^2} = \text{const}, \quad (2.47)$$

де n – частота обертання колеса вентилятора, с-1122.

Тобто при підвищенні коефіцієнта опору мережі ($K_{\{c\}}$), що призводить до зниження швидкості потоку повітря в зоні пневмосепарації (крива ($\Delta P_{\{c2\}} = \psi_2(Q)$)) (рис. 2.16), необхідно збільшувати частоту обертання до (n_2) колеса вентилятора, і навпаки, при зниженні ($K_{\{c\}}$) (крива ($\Delta P_{\{c1\}} = \psi_1(Q)$)) потрібне зменшення частоти обертання ((n_1)) колеса.

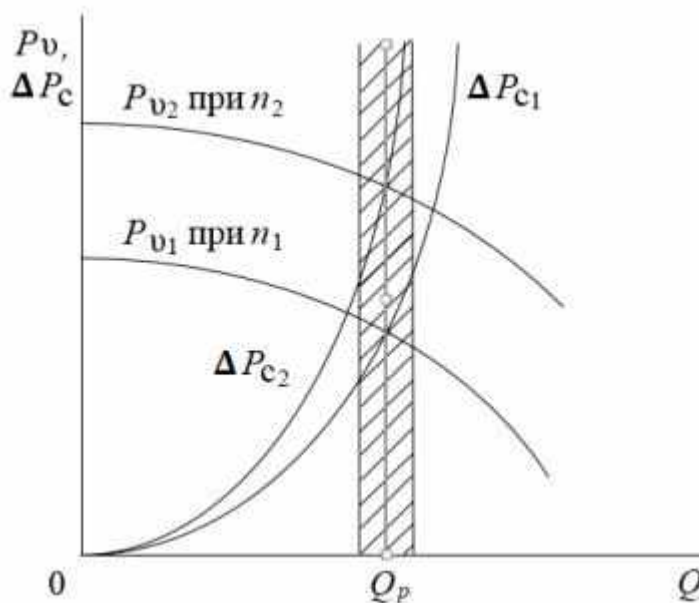


Рисунок 2.10 – Зміна режиму роботи вентилятора при зміні опору мережі

При постійній зміні частоти обертання колеса вентилятора спостерігатимуться безперервні перехідні процеси. Для того, щоб зменшити час і кількість перехідних процесів, доцільно виділити діапазон значень витрати

повітря, у межах якого не відбуватиметься коригування частоти обертання колеса вентилятора. Цей діапазон виділений штриховою зоною.

З усього вищевикладеного можна зробити висновок, що при зміні опору зернового шару можливо оптимізувати швидкість повітряного потоку в зоні сепарації шляхом зміни частоти обертання колеса вентилятора з найменшим опором мережі і, відповідно, більш економічним способом.

2.4 Розробка концепції сервісно-інженерної системи

Сучасні умови експлуатації зерноочисного обладнання вимагають впровадження ефективних сервісно-інженерних систем, здатних забезпечувати стабільність технологічного процесу, оперативний контроль параметрів роботи пневмосепаратора та своєчасне реагування на зміну умов функціонування машини. Особливого значення набуває автоматизація процесів моніторингу, діагностики та оптимізації режимів роботи пневмосепаратора, оскільки саме ці напрямки дозволяють підвищити якість очищення зерна, знизити втрати повноцінного зерна у відходи та підвищити енергоефективність роботи обладнання.

Концепція сервісно-інженерної системи пневмосепаратора передбачає створення комплексної автоматизованої системи, яка забезпечує безперервний збір, обробку та аналіз інформації про параметри технологічного процесу в режимі реального часу. Основною метою такої системи є підтримання оптимального режиму роботи машини незалежно від змін фізико-механічних властивостей зернового матеріалу та зовнішніх факторів.

Структурно сервісно-інженерна система включає:

- систему моніторингу параметрів технологічного процесу;
- систему діагностики технічного стану обладнання;
- систему автоматичного регулювання та оптимізації режимів роботи;
- інформаційно-аналітичний модуль;
- операторський інтерфейс.

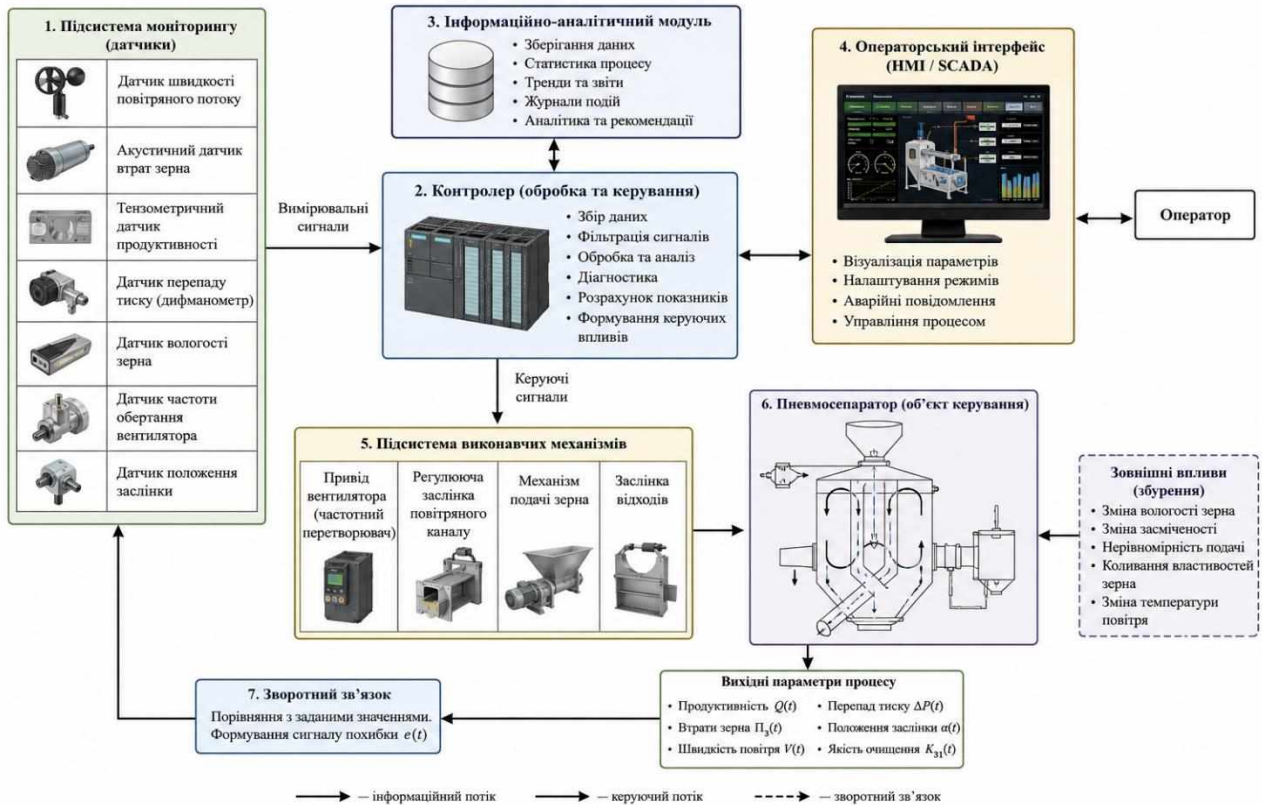


Рисунок 2.11 – Структурна схема сервісно-інженерної системи пневмосепаратора

Моніторинг є базовим елементом сервісно-інженерної системи та забезпечує постійний контроль основних параметрів роботи пневмосепаратора. До контрольованих параметрів належать: продуктивність машини; швидкість повітряного потоку; втрати зерна у відходи; перепад тиску в пневмосистемі; вологість зерна; положення регульовальних заслінок; частота обертання вентилятора.

Для отримання інформації використовуються різні типи датчиків: акустичні, тензометричні, оптичні, індуктивні, анемометричні та датчики тиску. Отримані сигнали надходять до контролера, де виконується їх попередня обробка, фільтрація та перетворення у цифровий формат.

Система моніторингу дозволяє:

- оперативно визначати відхилення параметрів від заданих значень;
- контролювати стабільність технологічного процесу;
- накопичувати статистичні дані;
- передавати інформацію оператору або SCADA-системі.

Таблиця 2.1 – Основні параметри моніторингу пневмосепаратора

Контрольований параметр	Тип датчика	Призначення
Швидкість повітряного потоку	Анемометр	Контроль режиму сепарації
Втрати зерна у відходи	Акустичний датчик	Оцінка ефективності очищення
Продуктивність машини	Тензометричний датчик	Контроль подачі зерна
Перепад тиску	Дифманометр	Оцінка стану повітряного каналу
Вологість зерна	Діелькометричний датчик	Коригування режимів очищення
Частота обертання вентилятора	Індуктивний датчик	Контроль роботи приводу

Використання систем моніторингу значно підвищує інформативність процесу очищення зерна та забезпечує можливість оперативного втручання у роботу машини.

Важливою складовою сервісно-інженерної системи є діагностика технічного стану пневмосепаратора. Основною метою діагностики є своєчасне виявлення несправностей, попередження аварійних ситуацій та оцінювання ступеня зношування вузлів машини.

Діагностична система здійснює контроль:

- стану вентилятора;
- рівня вібрацій;
- роботи електроприводів;
- герметичності пневмосистеми;
- стану датчиків;
- стабільності роботи виконавчих механізмів.

Для реалізації діагностики використовуються:

- вібраційний контроль;
- акустичний аналіз;
- контроль струмового навантаження електродвигунів;
- температурний контроль;
- аналіз параметрів повітряного потоку.

На основі аналізу отриманих сигналів система формує повідомлення про відхилення або несправності, що дозволяє своєчасно виконувати технічне обслуговування та запобігати виходу обладнання з ладу.

Впровадження автоматизованої діагностики дозволяє:

- скоротити час простоїв обладнання;
- знизити витрати на ремонт;
- підвищити надійність роботи машини;
- збільшити термін експлуатації вузлів пневмосепаратора.

Одним із ключових напрямків підвищення ефективності пневмосепаратора є автоматична оптимізація режимів його роботи. Під час експлуатації властивості зернового матеріалу можуть змінюватися, що призводить до порушення оптимального режиму сепарації. Тому система керування повинна забезпечувати автоматичне регулювання параметрів роботи машини.

Оптимізація режимів роботи передбачає:

- регулювання частоти обертання вентилятора;
- зміну швидкості повітряного потоку;
- керування подачею зерна;
- регулювання положення повітряних заслінок;
- підтримання допустимого рівня втрат зерна.

Основою роботи системи є алгоритм зворотного зв'язку, при якому поточні параметри процесу порівнюються із заданими значеннями. У разі виникнення відхилень контролер формує керуючі сигнали для виконавчих механізмів.

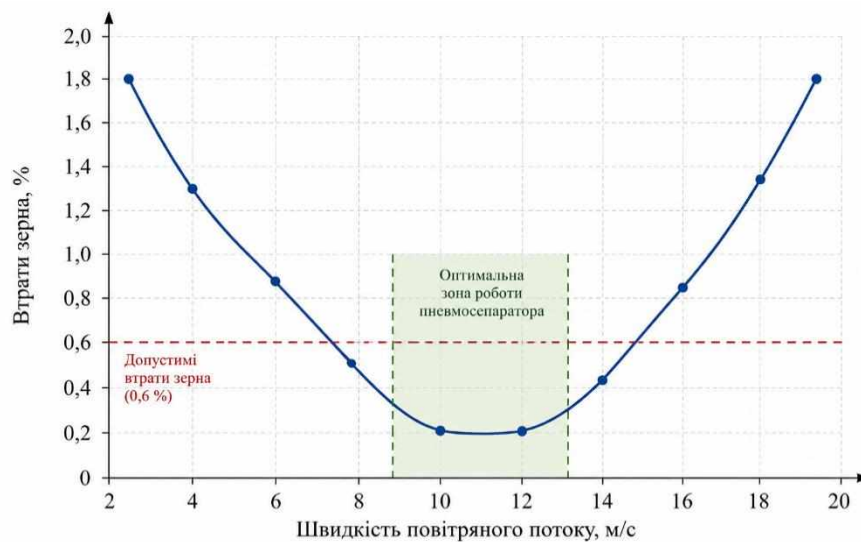


Рисунок 2.12 – Залежність втрат зерна від швидкості повітряного потоку

Для реалізації оптимізації можуть використовуватись ПІД-регулятори; адаптивні алгоритми керування; нечітка логіка; елементи прогнозування параметрів процесу.

Автоматичне регулювання дозволяє:

- підтримувати стабільну якість очищення;
- зменшувати втрати повноцінного зерна;
- підвищувати продуктивність машини;
- знижувати енергоспоживання;
- забезпечувати стійкість технологічного процесу.

Таблиця 2.2 – Переваги впровадження сервісно-інженерної системи

Напрямок впливу	Результат
Автоматизація контролю	Підвищення стабільності процесу
Діагностика обладнання	Зменшення аварійних зупинок
Регулювання режимів	Зниження втрат зерна
Моніторинг параметрів	Підвищення якості очищення
Предиктивний сервіс	Зменшення витрат на ремонт
Оптимізація роботи вентилятора	Зниження енергоспоживання

Таким чином, розроблена концепція сервісно-інженерної системи пневмосепаратора базується на комплексному поєднанні моніторингу, діагностики та автоматичної оптимізації режимів роботи. Реалізація такої системи дозволяє підвищити ефективність технологічного процесу очищення

зерна, забезпечити стабільність функціонування обладнання та знизити експлуатаційні витрати.

Висновки до розділу 2

У розділі розглянуто теоретичні основи функціонування пневмосепаратора зерна та обґрунтовано принципи побудови системи поточного контролю і керування технологічним процесом очищення зернового матеріалу. Встановлено, що ефективність пневмосепарації значною мірою залежить від стабільності швидкості повітряного потоку, фізико-механічних властивостей зернової суміші та режимів роботи вентилятора.

У результаті аналізу процесу взаємодії зернівки з лопаттю вентилятора розроблено математичну модель руху зернівки по криволінійній лопаті колеса вентилятора. Визначено закономірності зміни швидкості та траєкторії руху зернової частинки, а також встановлено параметри її сходження з лопаті.

Побудовано структурну модель пневмосепаратора як динамічної системи з керуючими впливами, зовнішніми збуреннями та вихідними параметрами. Обґрунтовано використання принципу зворотного зв'язку для автоматичного регулювання технологічного процесу. Як основний критерій керування запропоновано використовувати відхилення фактичних втрат зерна у відходи від допустимого значення.

Розроблено модель функціонування пневмосепаратора з пристроєм поточного контролю та управління, що включає систему датчиків, блок обробки інформації, виконавчі механізми та регулятор. Визначено основні контрольовані параметри технологічного процесу: швидкість повітряного потоку, продуктивність машини, втрати зерна у відходи, перепад тиску та положення регулювальних елементів.

У ході дослідження процесу співударяння зернівки зі стінкою осаджувальної камери встановлено, що акустичні коливання, які виникають у результаті удару, можуть бути використані для оцінювання втрат повноцінного зерна. Доведено, що параметри акустичного сигналу залежать від маси зернівки, швидкості її руху та коефіцієнта відновлення. Визначено, що коливання

металевої стінки відбуваються у діапазоні власних частот, які можуть бути використані для формування інформативного сигналу системи контролю.

Обґрунтовано можливість використання тензометричного витратоміра зерна, інтегрованого у конусний дільник потоку. Отримано залежність між подачею зернового матеріалу та силою впливу зернівок на поверхню конуса, що дозволяє визначати продуктивність пневмосепаратора в режимі реального часу.

Проведений аналіз аеродинамічних характеристик вентилятора та повітряної системи показав, що зміна опору зернового шару істотно впливає на швидкість повітряного потоку в зоні сепарації. Встановлено, що найбільш ефективним та енергоощадним способом стабілізації режимів роботи є регулювання частоти обертання колеса вентилятора замість дроселювання повітряного потоку.

Розроблено концепцію сервісно-інженерної системи пневмосепаратора, яка базується на комплексному поєднанні моніторингу, діагностики та автоматичної оптимізації режимів роботи. Запропонована система забезпечує безперервний контроль параметрів технологічного процесу, своєчасне виявлення відхилень та автоматичне коригування режимів роботи обладнання.

Впровадження сервісно-інженерної системи дозволяє підвищити ефективність очищення зерна, знизити втрати повноцінного зерна у відходи, скоротити енергоспоживання та підвищити надійність роботи пневмосепаратора. Отримані результати створюють основу для подальшої практичної реалізації автоматизованої системи

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Програма досліджень

Відповідно до поставлених у роботі завдань, розроблено програму експериментальних досліджень:

- провести експериментальні дослідження залежності між втратами зерна у відходи та параметрами сигналу акустичного датчика;
- дослідити вплив виду і вологості зернових культур на показники вимірювання втрат зерна у відходи акустичними датчиками;
- розробити апаратну і програмну частину пристрою поточного контролю та управління технологічним процесом пневмосепаратора зерна, а також виготовити експериментальну модель даного пристрою;

3.2. Обладнання та експериментальна установка

Для проведення досліджень впливу вологості насіння різних зернових культур на параметри звукового сигналу, який знімається з датчика втрат зерна, було створено експериментальну установку (рис. 3.1). Установка має таку конструкцію. Імітацією стінки осаджувальної камери є сталева пластина 5, товщина якої відповідає товщині стінки осаджувальної камери. З метою запобігання накопиченню зерна на пластині її встановлено під кутом нахилу $\alpha = 45^\circ$ до траєкторії руху зерна. На її нижній поверхні закріплено трансдюсер 6. Подача зерна на пластину здійснюється з бункера 2 за допомогою вібродозатора 3 через вертикальний канал 4 квадратного перерізу. Регулювання подачі насіння здійснюється заслінкою 1. У каналі зернівки під дією сили тяжіння набувають прискорення. Висота каналу $h_T = 4$ м забезпечує розгін зернівки до швидкості, близької до швидкості її сходу з лопаті колеса вентилятора пневмосепаратора. У момент удару зерна об пластину енергія співударяння перетворюється датчиком в електричні імпульси. Звуковий сигнал із трансдюсера записується на жорсткий диск персонального комп'ютера.



Рисунок 3.1 – Гравітаційна експериментальна установка: а – схема установки; б - вібродозатор з вимірювальним обладнанням; в - загальний вигляд установки; г - пластина із закріпленим знизу акустичним п'єзодатчиком; д – вібродозатор

Для виконання експериментальних досліджень пристрою поточного контролю та керування технологічним процесом останній було встановлено на пневмосепараторі, створеному на базі стейкхолдера кафедри механічної та електричної інженерії. Загальний вигляд пневмосепаратора [47, 50], [85, 105] представлено на рисунку 3.2.



Рисунок 3.2 – Загальний вигляд пневмосепаратора з пристроєм поточного контролю та управління технологічним процесом

Схему технологічного процесу пневмосепаратора з пристроєм поточного контролю та керування технологічним процесом зерноочисної машини подано на рисунку 2.3.

Для визначення втрат зерна у відходи було виготовлено пробовідбірник (с 3.3).

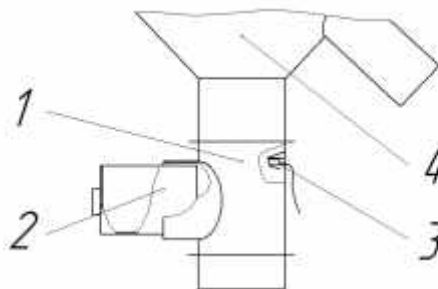


Рисунок 3.3 – Пробовідбірник; 1 – корпус пробовідбірника; 2 – ківш (висунутий з корпусу); 3 – кінцевий мікроперемикач; 4 – осаджувальна камера пневмосепаратора

Пробовідбірник змонтовано на патрубку виведення відходів із

пневмосепаратора. Він являє собою рухомий ківш для відбору проб, який можна миттєво вводити в патрубок і через проміжок часу – виводити назад. Пробовідбірник містить мікроперемикач, вплив на який відбувається в момент переміщення ковша в обидві сторони. Завдяки цьому за допомогою розташованої біля акустичного датчика сирени відтворюються короткі звукові імпульси. Ці імпульси фіксуються датчиком втрат зерна і, відповідно, накладаються на генерований ним сигнал. Тим самим забезпечується узгодження моменту відбору проб із відповідною ділянкою реалізації сигналу, про що буде детальніше описано в розділі 3.3.4. Це дозволяє досліджувати кореляційну залежність між параметрами звукового сигналу акустичного датчика та реальними втратами зерна у відходи.

При лабораторних дослідженнях пристрою контролю та управління технологічним процесом подача вихідного зернового матеріалу в пневмосепаратор регулювалася комплектом змінних дросельних кілець (рис.3.4,а, поз. 2). У центрі кожного знаходився отвір, діаметр якого відповідає конкретному значенню пропускної здатності (рис. 3.4,б).

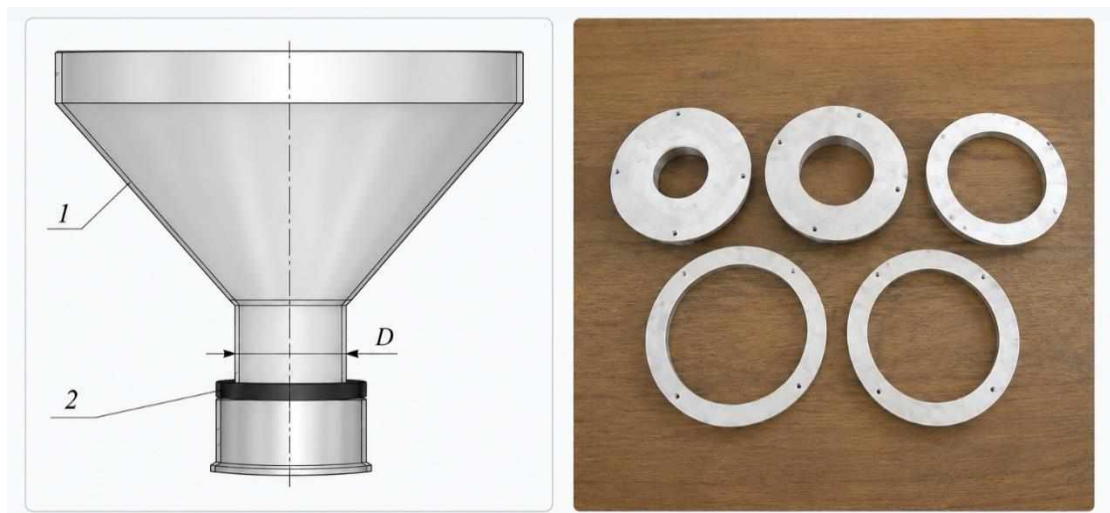


Рисунок 3.4 – Пристрій регулювання пропускної здатності машини: а – завантажувальний бункер з кільцями; б - загальний вигляд змінних кілець; 1 – бункер; 2 - кільце

Подача матеріалу в зернопровід здійснювалася розташованою на дні

бункера 1 заслінкою. Сам зернопровід бункера має фіксований діаметр, що відповідає максимальній подачі зернового матеріалу в пневмосепаратор (22,4 т/год). Досліджено вплив діаметра отвору кільця на подачу зерна в пневмосепаратор.

Як показали дослідження (Додаток Д), залежність прохідного діаметра кільця d (мм) від пропускної здатності G (т/год) з коефіцієнтом кореляції 0,99 описується рівнянням:

$$d = 37,153 \cdot G_{30}^{0.3675} \quad (3.1)$$

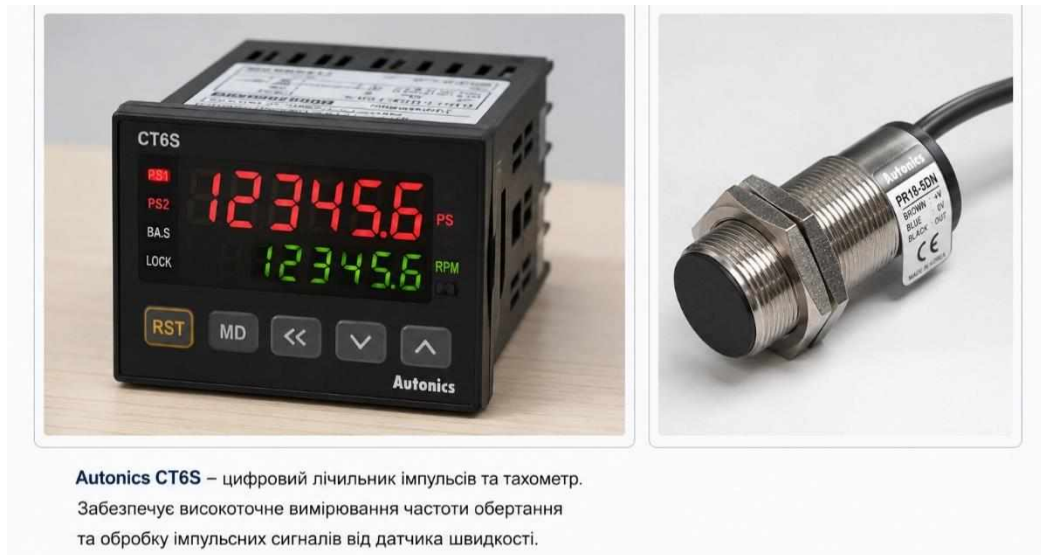
Використовуючи цей вираз, розраховувалися значення діаметрів прохідних отворів кільця для забезпечення необхідних значень пропускної здатності, які для зручності прийнято кратними п'яти (табл. 3.1). Останній стовпець відповідає режиму вільного виходу зерна з бункера, у зв'язку з чим пропускна здатність визначається діаметром зернопроводу.

Пропускна здатність G_{30} , т/год	5	10	15	20	22,4
Діаметр зернопроводу d , мм	67,1	86,6	100,5	111,7	119,1

Таблиця 3.1 – Відповідність пропускної здатності діаметру прохідного отвору

3.3. Методика проведення експериментів

Значення частоти обертання колеса вентилятора контролювали за допомогою сучасного цифрового лічильника імпульсів та тахометра Autonics СТ6S, який забезпечує високоточне вимірювання частоти обертання та обробку імпульсних сигналів від датчика швидкості. (рис. 3.5). Для цього на приводному шківі вала колеса вентилятора змонтовано диск з пелюстками. Фотодатчик закріплено на рамі пневмосепаратора таким чином, що при обертанні вала пелюстки проходять через щілину датчика, який генерує електричні імпульси для лічильника. Таким чином лічильник імпульсів відображає на циферблаті поточну частоту обертання колеса вентилятора.



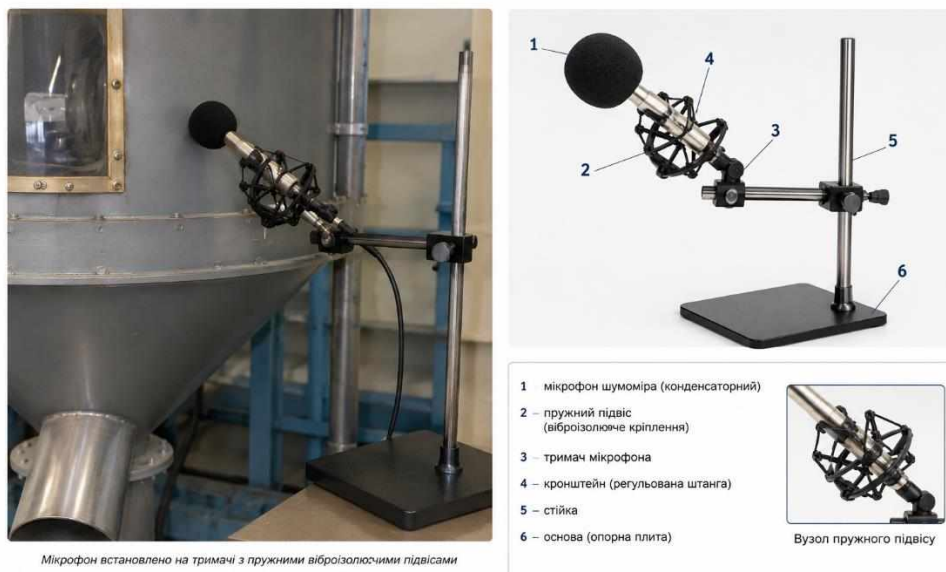
Autonics CT6S – цифровий лічильник імпульсів та тахометр. Забезпечує високоточне вимірювання частоти обертання та обробку імпульсних сигналів від датчика швидкості.

а

б

Рисунок 3.5 - Лічильник імпульсів: а - загальний вигляд; б - датчик

Для вимірювання параметрів акустичного сигналу використовувався цифровий шумомір професійного класу UNI-T UT353BT із зовнішнім конденсаторним мікрофоном та функцією реєстрації сигналу. Мікрофон встановлювали на віброзахищеному тримачі з еластичними підвісами для мінімізації впливу механічних коливань корпусу пневмосепаратора.



Мікрофон встановлено на тримачі з пружними віброізолюючими підвісами для виключення передачі вібрації від корпусу машини.

Рисунок 3.6 – Тримач з мікрофоном шумоміра

Шумомір застосовувався на початковому етапі досліджень, після чого

виникла потреба в альтернативі. Це пов'язано з тим, що вартість шумоміра є занадто високою для використання його в повітряній системі ЗОМ, а умови експлуатації складними. Тому були вивчені інші можливі варіанти запису реалізації параметрів звукового сигналу. Як альтернативні розглядалися різні п'єзOMETричні мікрофони і датчики, оцінювався їх частотний діапазон сприйняття звукового сигналу. Найбільш доцільним за частотними характеристиками та вартістю виявився акустичний трансд'юсер SOHO моделі Т-1. Даний прилад наведено на рисунку 3.7. Трансд'юсер закріплювали на зовнішній поверхні осаджувальної камери за допомогою двосторонньої клейкої стрічки. Пристрій забезпечував сприйняття коливань стінки камери, що виникали внаслідок ударів зернин.



а – загальний вигляд

б – встановлення на стінці осаджувальної камери

Рисунок 3.7 - Трансд'юсер SOHO (модель Т-1)

Проби вихідного і очищеного зерна, а також відходів розділялися на пневмокласифікаторі Petkus К-293 (Німеччина) (рис. 3.8), визначалась маса повноцінного зерна в навісці, обчислювалося значення відносних втрат зерна і повнота виділення домішок.

Швидкість повітря в пневмосепарувальному каналі пневмокласифікатора контролювалася за положенням поплавка ротаметра, що показує витрату повітря в м³/год. Висота заслінки вібродозатора встановлювалася з урахуванням надійного проходження матеріалу через щілину (у нашому випадку дорівнює 7

мм), а частота обертання вібратора – для виключення зависання залишків матеріалу на дні вібродозатора. Далі встановлювалася швидкість витання повноцінних зернин при контролі через оглядове вікно в пневмосепарувальному каналі. Гранична витрата (швидкість) повітря отримана рівною 52 м³/год, при якій зерно починає виноситися в осаджувальну камеру.



а – загальний вигляд



б – вид з іншого боку

Рисунок 3.8 - Пневмокласифікатор Petkus K-293

У процесі експериментальних досліджень масу навісок вимірювали електронними вагами МЕРА ВМ 2/3 і лабораторними електронними вагами CASBEE MW-1200 [120]. Зважування великих порцій зерна здійснювали на платформних вагах РП-100. Вологість зерна вимірювали зерновологоміром WILE-35.

Прилади та обладнання представлені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.1 – Перелік обладнання та вимірювальних приладів, використаних під час експериментальних досліджень пневмосепаратора

№ п.п.	Найменування	Марка	Клас точності	Призначення
1	Перетворювач частоти	Delta VFD037E43A	–	Живлення та регулювання частоти

№ п.п.	Найменування	Марка	Клас точності	Призначення
				обертання асинхронного електродвигуна
2	Цифровий шумомір	Testo 815	Кл. 1	Визначення рівня шуму при ударі зернівок об обвід осаджувальної камери
3	Акустичний трансд'юсер	SOHO T-1	–	Вимірювання акустичних коливань від удару зернівок об пластину та обвід осаджувальної камери
4	Пневмокласифікатор	Petkus K-293	–	Поділ зернового матеріалу та домішок за аеродинамічними характеристиками
5	Персональний комп'ютер з програмним забезпеченням	Intel Core i5 / Arduino IDE / LabVIEW	–	Запис, накопичення та обробка звукових сигналів і експериментальних даних
6	Цифровий лічильник імпульсів та тахометр	Autonics CT6S	±0,1 %	Вимірювання частоти обертання вентиляційного колеса
7	Ваги платформні	CAS DB-II	±0,05 кг	Визначення маси отриманих фракцій і компонентів
8	Електронні ваги	AXIS BDU-3	±1 г	Вимірювання маси отриманих фракцій і компонентів
9	Електронні лабораторні ваги	Radwag PS 1000.R2	±0,01 г	Вимірювання маси отриманих фракцій і компонентів
10	Вологомір зерна	Wile 55	±0,5 %	Визначення вологості зерна
11	Диференціальний мікроманометр	Testo 510i	Кл. 1	Визначення параметрів повітряного потоку в каналі пневмосепаратора
12	Трубка Піто-Прандтля	Dwyer 160 Series	–	Вимірювання швидкісних параметрів повітряного потоку в каналі класифікатора

Застосування гравітаційної експериментальної установки дало змогу зменшити витрати часу і ресурсів, а також усунути вплив побічних чинників (аеродинамічного та механічного шуму пневмосепаратора) під час дослідження впливу вологості зернового матеріалу різних культур на параметри звукового сигналу, що виникає при зіткненні зернівок зі стінкою осаджувальної камери. У дослідженнях використовувався зерновий матеріал без домішок таких культур: пшениця з вологістю 12,9...34,0%, ячмінь – 14,5–35,7%, жито – 12,0–35,5% і овес – 12,0–35,5%. Відсутність домішок пояснюється тим, що п'єзодатчик переважно фіксує удари твердих частинок, співмірних із зернівкою, тоді як вплив домішок можна вважати незначним. Під час проведення експерименту порція вихідної зернової суміші подавалася вібродозатором у вертикальний канал установки. Розігнане під дією власної ваги зерно в каналі вдарялося об пластину. Сигнал із п'єзодатчика, закріпленого зі зворотного боку пластини, записувався на жорсткий диск персонального комп'ютера. Початок і завершення процесу зіткнення зернівок із пластиною (зупинка вібродозатора) чітко фіксуються на осцилограмі (реалізації), що усуває необхідність використання генератора звукових імпульсів. Подальша обробка отриманих даних здійснювалася аналогічно до обробки при роботі з пневмосепаратором.

3.4. Методика збору та обробки даних

При проведенні досліджень відбір проб супроводжувався записом сигналу з акустичного датчика (цифровий шумомір Testo 815 та трансд'юсер SOHO T-1) у WAV-файл з розрядністю 16 біт на жорсткий диск персонального комп'ютера з подальшою обробкою параметрів сигналу за допомогою програм Reaper v.6 та Audacity під керуванням ОС Windows 10. Частота дискретизації записуваних файлів становила 44,1 кГц, що виключало появу спотворень, пов'язаних з ефектом аліасингу (накладання спектрів) [103]. Вбудований низькочастотний фільтр звукової карти ПК забезпечував додаткове пригнічення високочастотних перешкод. Ефект аліасингу проявляється у випадку, коли частотна складова сигналу перевищує половину частоти дискретизації та

переходить у нижню частину спектра корисного сигналу датчика [108, 112, 117].

На першому етапі запис сигналу здійснювався за допомогою цифрового шумоміра Testo 815 із активованим смуговим фільтром у діапазоні близько 8 кГц [42]. Реалізація параметрів звукового сигналу при проведенні досліджень складалася з чотирьох фаз (рис. 3.10) [45].

У першу фазу (I) входив лише аеродинамічний і механічний шум, що виникав під час роботи вентилятора без подачі зерна у пневмосепаратор. Друга фаза (II) починалася з моменту подачі зернового матеріалу із завантажувального бункера. Відбувалася взаємодія матеріалу з поверхнями елементів пневмосепаратора до моменту, коли перші зернівки, винесені повітряним потоком із зони сепарації та пройшовши через колесо вентилятора, досягали стінки осаджувальної камери. Цій фазі відповідав аеродинамічний та механічний шум роботи машини із зерновим матеріалом.

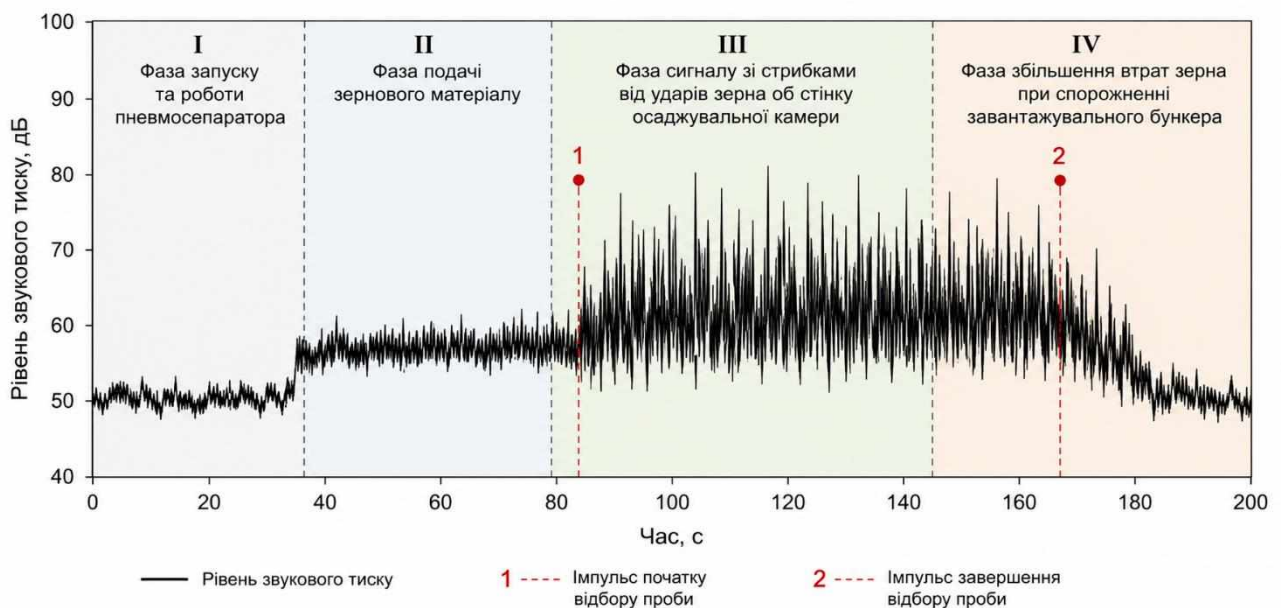


Рисунок 3.10 – Реалізація рівня звукового тиску (шумомір Testo 815; смуговий фільтр 8 кГц): I – фаза запуску та роботи пневмосепаратора; II – фаза подачі зернового матеріалу; III – фаза сигналу зі стрибками від ударів зерна об стінку осаджувальної камери; IV – фаза збільшення втрат зерна при спорожненні завантажувального бункера; 1 – імпульс початку відбору проби; 2 – імпульс завершення відбору проби.

Про початок третьої фази (III) свідчили імпульсні стрибки на реалізації звукового сигналу, що виникали внаслідок ударів зернівок об обвід осаджувальної камери. Після стабілізації подачі зерна починався відбір проби. Цьому відповідав виражений імпульс 1 на реалізації сигналу, який супроводжувався характерним звуковим імпульсом. У цей момент пробовідбірник вводили у патрубок відходів до упору.

Під час спорожнення бункера подача зерна різко знижувалася, що відповідало завершенню III фази та початку IV фази. Це призводило до зменшення опору зернового шару у пневмосепарувальному каналі, підвищення швидкості повітряного потоку та збільшення втрат повноцінного зерна у відходи. Тому відбір проби завершували до повного спорожнення бункера (імпульс 2). Для запобігання переповненню пробовідбірника підбирали відповідний часовий інтервал перебування ковша у зоні відбору проби.

На рисунку 3.11 наведено типовий фрагмент реалізації рівня звукового тиску, отриманого за допомогою трансд'юсера SOHO T-1. Оскільки акустичний датчик був підключений безпосередньо до входу звукової карти ПК, виконувалася додаткова цифрова обробка сигналу смуговим фільтром у програмному середовищі Reaper v.6, аналогічно роботі смугового фільтра шумоміра Testo 815 у діапазоні 8 кГц.

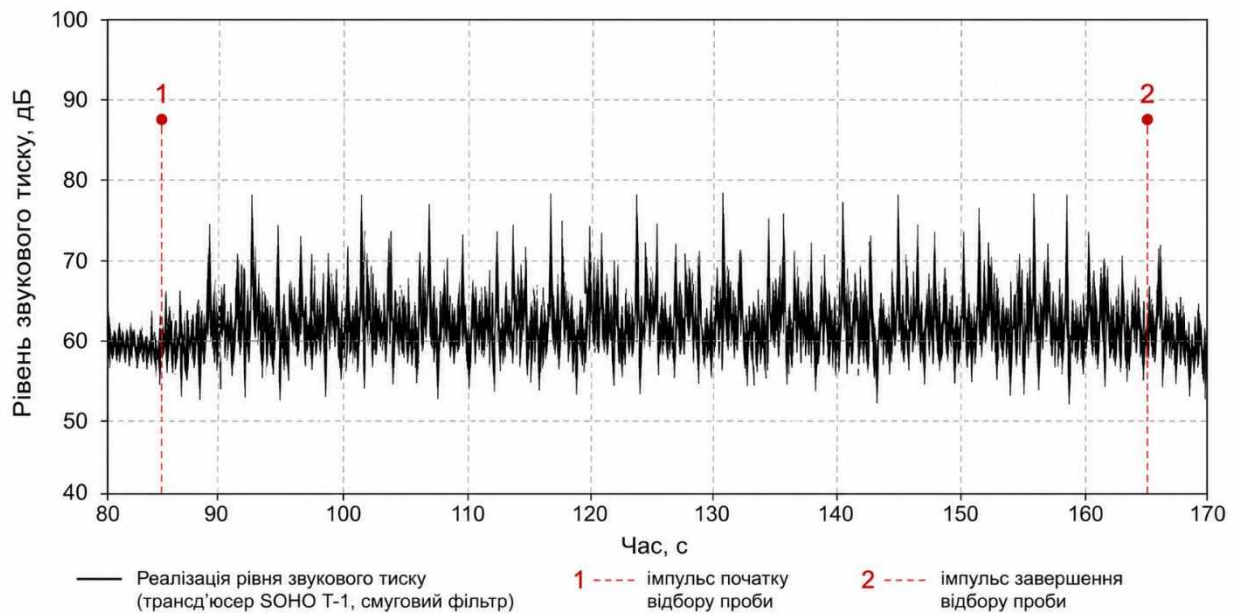


Рисунок 3.11 – Відрізок реалізації рівня звукового тиску (трансд’юсер SOHO T-1, смуговий фільтр).

Інтервал між імпульсами 1 і 2 поділяли на три приблизно рівні ділянки, які піддавали спектральному аналізу для визначення рівня звукового тиску за допомогою програмного забезпечення Reaper v.6. На спектральній щільності виділявся діапазон частот 7,7...8,3 кГц (рис. 3.12), після чого визначалося середнє значення рівня за виразом (3.1).

Рівень звукового тиску визначався як середнє арифметичне трьох отриманих значень. Акустичний шум визначали аналогічним способом у II фазі роботи машини.

Рівень звукового тиску переводився з логарифмічної шкали у лінійну. Для цього використовувалася напруга електричного сигналу:

$$u = u_0 \cdot 10^{0,1p}, \text{ мВ}, \quad (3.2)$$

де u_0 – напруга сигналу, еквівалентна рівню 0 дБ; $u=1$ мВ.

Далі визначалась потужність сигналу за відповідним виразом:

$$P = \frac{u^2}{R_0}, \quad (3.3)$$

де P – еквівалентна потужність звукового сигналу, мкВт;

R_0 – еквівалентний опір; $R_0=1$ Ом.

Визначення потужності звукового сигналу зіткнення зернівок зі стінкою осаджувальної камери здійснювалося шляхом віднімання значення потужності у II фазі від значення потужності звукового сигналу у III фазі. Усі розрахунки виконувалися на персональному комп'ютері із використанням програмного забезпечення Microsoft Excel.

Отримана під час III фази навіска розділялася на пневмокласифікаторі Petkus K-293, після чого визначалась маса повноцінного зерна у навісці, повнота виділення домішок та відносні втрати зерна за виразами:

$$E = \frac{m_{\phi}}{m_T} 100, \% \quad (3.4)$$

$$P_z = \frac{m_{z0}}{m_z} 100, \% \quad (3.5)$$

де m_{ϕ} – маса виділених домішок, г;

m_T – маса домішок, які теоретично можуть бути виділені повітряним потоком, г;

m_{z0} – маса повноцінного зерна у відходах, г;

m_z – маса зерна, що надійшло на очищення, г.

На підставі отриманих експериментальних даних та параметрів звукового сигналу у розділі 4 наведено результати досліджень та їх аналіз.

3.5. Критерії оцінки ефективності

Дослідження залежності між параметрами сигналу акустичного датчика та фактичними втратами зерна у відходи проводилися за різних умов роботи пневмосепаратора. Основними змінними факторами були зернове навантаження, вологість зернового матеріалу та частота обертання колеса вентилятора. Особливу увагу приділяли саме вологості зерна, оскільки вона впливає на масу,

пружність, швидкість витання зернівок і характер їх удару об стінку осаджувальної камери.

Для отримання зерна з різними значеннями вологості застосовували два способи зволоження.

Перший спосіб передбачав послідовне зволоження одного й того самого зернового матеріалу. Спочатку проводили дослід із зерном початкової вологості, після цього матеріал зволожували до наступного запланованого значення вологості й знову виконували дослідження. Такий спосіб доцільно застосовувати тоді, коли для дослідів потрібна значна маса зерна, а загальна кількість матеріалу обмежена. Саме цей спосіб використовували під час досліджень на пневмосепараторі, оскільки маса навіски пшениці становила близько 60 кг.

Другий спосіб полягав у тому, що одночасно готували кілька однакових за масою навісок зернового матеріалу. Частину навісок зволожували до різних значень вологості, а одну залишали без зволоження як контрольну. Цей спосіб дозволяє швидше отримати необхідну кількість зразків із різною вологістю. Однак при його застосуванні потрібно враховувати можливість самонагрівання зерна та його псування, тому всі операції необхідно виконувати оперативно. Другий спосіб використовували під час досліджень на гравітаційній експериментальній установці, де маса навіски кожної культури становила близько 2 кг.

Перед початком зволоження визначали початкову вологість зернового матеріалу за допомогою вологоміра зерна. Це дозволяло встановити фактичний стан матеріалу та розрахувати необхідну кількість води для досягнення запланованого рівня вологості.

Маса води, необхідної для зволоження, визначалася за формулою:

$$m_B = m_{32} - m_{31'} \quad (3.6)$$

де m_B – маса води, необхідної для зволоження, кг;

$m_{31'}$ – маса зерна до зволоження, кг;

m_{32} – маса зерна після зволоження, кг.

Маса зернового матеріалу після зволоження обчислювалася за виразом:

$$m_{32} = m_{31} \frac{100 - \omega_1}{100 - \omega_2} \cdot 1,065, \quad (3.7)$$

де ω_1 – вологість зерна до зволоження, %;

ω_2 – запланована вологість зерна після зволоження, %;

1,065 – коефіцієнт, що враховує втрати вологи в процесі випаровування під час зволоження.

Після перетворення формул отримували вираз для визначення кількості води, необхідної для зволоження зерна:

$$m_B = m_{31} \frac{\omega_2 - \omega_1}{100 - \omega_2} \cdot 1,065. \quad (3.8)$$

Розрахунковий крок зміни вологості зерна між окремими дослідями становив:

$$\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$$

Після розрахунку необхідної кількості води виконували безпосереднє зволоження зернового матеріалу. Для цього зерно розміщували у спеціальних лотках, після чого воду рівномірно наносили методом обприскування. Одночасно матеріал перемішували, щоб забезпечити рівномірний розподіл вологи по всьому об'єму навіски.

Після внесення води зерно витримували протягом трьох діб. У цей період його періодично перемішували для вирівнювання вологості між окремими зернівками. Зерновий матеріал зберігали у прохолодному місці при додатній температурі, щоб запобігти самонагріванню, розвитку мікрофлори та погіршенню якості зерна.

Після завершення процесу витримування повторно вимірювали вологість зерна. Якщо фактичне значення відповідало запланованому, матеріал використовували для проведення експериментальних досліджень. Якщо

вологість відрізнялася від необхідного значення, виконували додаткове коригування шляхом перемішування або повторного дозованого зволоження.

Таким чином, застосована методика дозволяла отримати зерновий матеріал із заданими значеннями вологості та забезпечити порівнянність результатів досліджень. Це було необхідно для встановлення впливу вологості на параметри акустичного сигналу, втрати зерна у відходи та ефективність роботи пневмосепаратора.

Оцінювання ефективності роботи пневмосепаратора та системи поточного контролю технологічного процесу здійснювалося за комплексом показників, які характеризують якість очищення зернового матеріалу, стабільність роботи повітряної системи, рівень втрат повноцінного зерна та енергоефективність роботи обладнання. Використання декількох взаємопов'язаних критеріїв дозволяє найбільш об'єктивно оцінити ефективність функціонування пневмосепаратора в різних режимах роботи.

Одним із основних критеріїв оцінки ефективності є повнота виділення домішок. Даний показник характеризує якість очищення зернового матеріалу та визначає здатність пневмосепаратора відокремлювати легкі домішки від повноцінного зерна. Повнота виділення домішок обчислювалася за виразом:

Важливим показником ефективності роботи пневмосепаратора є втрати повноцінного зерна у відходи. Саме цей параметр використовувався як основний критерій оцінювання роботи системи поточного контролю та управління технологічним процесом. Відносні втрати зерна визначалися за формулою:

Зниження втрат повноцінного зерна при одночасному забезпеченні високої повноти виділення домішок свідчить про ефективний режим роботи пневмосепаратора.

Для оцінки роботи системи акустичного контролю додатково використовували параметри звукового сигналу, що виникає при ударах зернівок об стінку осаджувальної камери. Аналіз рівня та потужності акустичного сигналу дозволяв визначати інтенсивність потрапляння повноцінного зерна у відходи. При збільшенні кількості зернівок, що виносяться повітряним потоком у відходи, амплітуда та потужність звукового сигналу зростають.

Важливим критерієм оцінювання ефективності також є стабільність повітряного потоку в пневмосепарувальному каналі. Коливання швидкості повітря призводять до погіршення якості очищення та збільшення втрат зерна. Тому в процесі досліджень контролювали параметри повітряного потоку та перепад тиску в повітряній системі.

Окрему увагу приділяли оцінюванню продуктивності пневмосепаратора. Продуктивність характеризує кількість зернового матеріалу, що проходить через машину за одиницю часу, та визначає ефективність використання обладнання в умовах виробництва. Під час досліджень оцінювався вплив продуктивності на якість очищення, втрати зерна та параметри акустичного сигналу.

Крім технологічних показників, оцінювалася енергоефективність роботи системи. Використання частотного регулювання вентилятора дозволяє змінювати швидкість повітряного потоку залежно від режиму роботи пневмосепаратора та властивостей зернового матеріалу. Це забезпечує зниження енерговитрат порівняно з традиційним дросельним регулюванням повітряної системи.

Таким чином, комплексне використання наведених критеріїв дозволяє всебічно оцінити ефективність роботи пневмосепаратора, визначити оптимальні режими його функціонування та оцінити ефективність системи поточного контролю і управління технологічним процесом очищення зернового матеріалу.

Висновки до розділу 3

У розділі розроблено та обґрунтовано методику проведення експериментальних досліджень системи поточного контролю та управління технологічним процесом пневмосепаратора зерна. Сформовано програму досліджень, яка передбачала вивчення залежності між параметрами акустичного сигналу та фактичними втратами повноцінного зерна у відходи, а також дослідження впливу вологості зернового матеріалу, продуктивності машини та частоти обертання вентилятора на показники роботи пневмосепаратора.

Для проведення досліджень створено гравітаційну експериментальну установку, яка дозволила моделювати процес удару зернівок об поверхню осаджувальної камери без впливу аеродинамічного та механічного шуму пневмосепаратора. Використання установки забезпечило можливість дослідження впливу фізико-механічних властивостей зернового матеріалу на параметри акустичного сигналу при різних значеннях вологості зерна.

Експериментальні дослідження системи поточного контролю та управління проводилися на пневмосепараторі, оснащеному акустичними датчиками, цифровими засобами вимірювання та системою реєстрації сигналів. Для контролю параметрів технологічного процесу використовували сучасне вимірювальне обладнання, зокрема цифровий шумомір Testo 815, акустичний трансд'юсер SOHO T-1, тахометр Autonics CT6S, пневмокласифікатор Petkus K-293 та комп'ютерні системи збору й обробки даних.

Розроблено методику реєстрації та обробки акустичного сигналу, що виникає при ударах зернівок об стінку осаджувальної камери. Встановлено послідовність фаз реалізації звукового сигналу при роботі пневмосепаратора та обґрунтовано використання спектрального аналізу сигналу в діапазоні частот 7,7...8,3 кГц. Це дозволило виділити інформативну складову сигналу, пов'язану з втратами повноцінного зерна у відходи.

У ході досліджень удосконалено методику визначення втрат зерна шляхом синхронізації моменту відбору проб із відповідною ділянкою реалізації акустичного сигналу. Для цього використано спеціально розроблений пробовідбірник із мікроперемикачем, що забезпечує формування імпульсних міток у сигналі акустичного датчика.

Розроблено методику зволоження зернового матеріалу для отримання необхідних значень вологості при проведенні досліджень. Використання двох способів зволоження дозволило забезпечити необхідну кількість зернового матеріалу з різними значеннями вологості та підвищити достовірність експериментальних результатів.

Обґрунтовано систему критеріїв оцінювання ефективності роботи пневмосепаратора та системи поточного контролю. Основними критеріями

прийнято повноту виділення домішок, втрати повноцінного зерна у відходи, параметри акустичного сигналу, стабільність повітряного потоку, продуктивність та енергоефективність роботи обладнання. Комплексне використання зазначених критеріїв дозволяє всебічно оцінити ефективність функціонування пневмосепаратора та визначити оптимальні режими його роботи.

Отримані в розділі результати створюють необхідну методичну основу для проведення подальших експериментальних досліджень, аналізу параметрів акустичного сигналу та розробки ефективної системи автоматизованого контролю втрат зерна у пневмосепараторі.

РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Висновки до розділу 4

У результаті лабораторних досліджень встановлено, що при зіткненні зернівок зі сталеву пластину на виході акустичного п'єзодатчика формується електричний сигнал, параметри якого залежать від подачі зерна та його вологості. Визначено, що корисна складова сигналу знаходиться в діапазоні частот 1,5...14 кГц, а найбільш доцільною для фільтрації є частота зрізу 8000 Гц.

Встановлено експоненційну залежність між втратами зерна у відходи та рівнем звукового тиску сигналу акустичного датчика з коефіцієнтом кореляції не нижче $R^2 = 0,99$. Доведено, що зі збільшенням вологості зерна рівень звукового тиску зменшується внаслідок зниження твердості зернівок та збільшення втрат енергії удару.

Отримано лінійну залежність між втратами зерна та електричною напругою на виході п'єзодатчика з коефіцієнтом кореляції не нижче $R^2 = 0,97$.

Визначено коригувальні коефіцієнти, які враховують вплив вологості зерна пшениці, жита та вівса на параметри сигналу. Для зерна ячменю вплив вологості виявився незначним.

Експериментально підтверджено можливість використання приведеної потужності сигналу шумоміра для визначення втрат зерна у відходи. Встановлено лінійну залежність між приведеною потужністю сигналу та втратами зерна з коефіцієнтом кореляції не нижче $R^2 = 0,99$.

Розроблено та досліджено систему поточного контролю і керування технологічним процесом пневмосепаратора, яка включає акустичний п'єзодатчик втрат зерна, тензометричний витратомір, мікроконтролерний базовий блок та перетворювач частоти електродвигуна вентилятора. Встановлено, що використання тензометричного датчика дозволяє визначати подачу зерна з похибкою до 0,5 %.

Розроблено алгоритм роботи базового блока системи автоматизації на основі мікроконтролера ATmega16 із реалізацією цифрової обробки сигналів, фільтрації шумів та автоматичного керування режимами роботи вентилятора. Використання системи автоматичного регулювання забезпечує стабілізацію технологічного процесу очищення зерна та зменшення впливу людського фактора.

Порівняння запропонованої системи з традиційними методами контролю показало її переваги, які полягають у можливості безперервного моніторингу втрат зерна, оперативного регулювання режимів роботи пневмосепаратора, зниження енерговитрат та підвищення якості очищення зернового матеріалу.

РОЗДІЛ 5. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБОК

У розділі розглянуто практичну реалізацію розробленої системи поточного контролю та управління технологічним процесом пневмосепаратора зерна. На основі проведених досліджень та розробок сформовано конструктивні, сервісні, безпекові та екологічні рішення, спрямовані на підвищення ефективності роботи обладнання.

У результаті модернізації пневмосепаратора запропоновано інтеграцію комплексу датчиків контролю, мікроконтролерного блока керування та системи частотного регулювання вентилятора. Використання акустичного датчика втрат зерна, тензометричного витратоміра та системи автоматизованого керування дозволило забезпечити безперервний контроль технологічного процесу очищення зерна та стабілізацію режимів роботи машини.

Встановлено, що використання частотного регулювання електропривода вентилятора є більш ефективним порівняно з традиційним дроселюванням повітряного потоку. Такий підхід забезпечує зниження енергоспоживання, покращення стабільності повітряного потоку та підвищення ефективності сепарації зернового матеріалу.

Розроблено систему технічного обслуговування та діагностики пневмосепаратора, яка включає контроль стану датчиків, перевірку повітряної системи, моніторинг температури та вібрацій, а також автоматизоване виявлення несправностей. Запровадження регламентного сервісного обслуговування дозволяє зменшити ймовірність аварійних відмов та підвищити надійність роботи обладнання.

У підрозділі охорони праці та безпеки встановлено, що основними небезпечними факторами при експлуатації пневмосепаратора є підвищений рівень пилу, шуму, вібрації, наявність рухомих механізмів та можливість виникнення пилових вибухів. Для забезпечення безпечної роботи запропоновано комплекс організаційних і технічних заходів, які включають герметизацію обладнання, використання аспіраційних систем, вибухозахищеного

електрообладнання, заземлення та автоматизованих систем контролю технічного стану машини.

Проведена екологічна оцінка показала, що найбільший вплив пневмосепаратора на навколишнє середовище пов'язаний із утворенням зернового пилу, шумовим навантаженням та енергоспоживанням. Використання сучасних аспіраційних систем, автоматизованого керування та енергоефективних режимів роботи дозволяє зменшити негативний вплив обладнання на довкілля та забезпечити відповідність сучасним екологічним вимогам.

Таким чином, практична реалізація розроблених конструктивних, сервісних, безпекових та екологічних рішень підтвердила можливість створення ефективної автоматизованої системи керування пневмосепаратором зерна. Запропоновані технічні рішення дозволяють підвищити ефективність очищення зернового матеріалу, зменшити втрати повноцінного зерна, знизити енергоспоживання, підвищити надійність роботи обладнання та забезпечити безпечні умови праці персоналу.

ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне науково-практичне завдання підвищення ефективності роботи пневмосепараторів зерна шляхом впровадження сервісно-інженерних методів контролю та автоматизації технологічного процесу очищення зернового матеріалу.

У результаті аналізу сучасного стану зерноочисного обладнання встановлено, що ефективність роботи пневмосепараторів значною мірою залежить від стабільності повітряного потоку, фізико-механічних властивостей зернового матеріалу та рівня автоматизації технологічного процесу. Визначено основні недоліки існуючих систем керування, серед яких відсутність оперативного контролю втрат зерна, нестабільність режимів роботи та підвищені енерговитрати.

У теоретичній частині роботи розроблено математичні моделі функціонування пневмосепаратора зерна як динамічної системи. Обґрунтовано використання акустичного методу контролю втрат зерна у відходи на основі аналізу звукових сигналів, що виникають при ударах зернівок об стінку осаджувальної камери. Проведене математичне моделювання руху зернівки по лопаті вентилятора дозволило визначити параметри взаємодії зерна з елементами повітряної системи та підтвердило можливість використання акустичних параметрів як інформаційного сигналу для автоматичного керування процесом сепарації.

У процесі експериментальних досліджень розроблено та виготовлено гравітаційну експериментальну установку, а також модернізований пневмосепаратор із системою поточного контролю технологічного процесу. Дослідження проводилися для зерна пшениці, ячменю, жита та вівса при різних значеннях вологості та продуктивності машини.

Експериментально встановлено наявність стійкої кореляційної залежності між втратами зерна у відходи та параметрами акустичного сигналу на виході п'єзодатчика. Визначено, що зі збільшенням вологості зерна рівень звукового тиску та амплітуда електричного сигналу зменшуються внаслідок зміни фізико-

механічних властивостей зернівок. Отримані математичні залежності між втратами зерна, рівнем звукового тиску та електричною напругою дозволили сформулювати основу для автоматичного контролю технологічного процесу очищення зерна.

Доведено, що використання акустичного трансд'юсера SOHO T-1 забезпечує достатню точність вимірювання параметрів сигналу та може використовуватися як більш доступна альтернатива дороговартісним шумомірам у системах автоматичного контролю пневмосепараторів.

У роботі запропоновано модернізацію пневмосепаратора шляхом інтеграції системи автоматичного контролю та керування, до складу якої входять акустичний датчик втрат зерна, тензометричний витратомір, датчики швидкості повітряного потоку та перепаду тиску, мікроконтролерний блок керування і частотний перетворювач приводу вентилятора. Запропонована система дозволяє здійснювати безперервний моніторинг параметрів технологічного процесу та автоматично коригувати режими роботи обладнання.

Встановлено, що використання частотного регулювання електропривода вентилятора є більш енергоефективним порівняно з традиційним дросельним регулюванням повітряного потоку. Застосування частотного керування дозволяє знизити енергоспоживання, стабілізувати процес сепарації та підвищити ефективність очищення зерна.

Розроблено систему сервісного обслуговування та діагностики пневмосепаратора, яка включає контроль технічного стану обладнання, моніторинг вібрацій, температури та параметрів роботи датчиків. Використання автоматизованої системи діагностики дозволяє своєчасно виявляти несправності та зменшувати кількість аварійних зупинок обладнання.

У роботі також розглянуто питання охорони праці, пиловихобезпеки та екологічної безпеки експлуатації пневмосепаратора. Встановлено, що основними небезпечними факторами є зерновий пил, шум, вібрації та можливість утворення вибухонебезпечних пилоповітряних сумішей. Запропоновано комплекс технічних та організаційних заходів щодо забезпечення безпечної експлуатації обладнання, включаючи аспірацію,

герметизацію, заземлення, використання вибухозахищеного електрообладнання та автоматизованих систем контролю.

Практична цінність роботи полягає у можливості впровадження розробленої системи контролю та автоматизації на існуючих пневмосепараторах без суттєвої зміни їх конструкції. Запропоновані рішення дозволяють підвищити ефективність очищення зерна, зменшити втрати повноцінного зерна у відходи, знизити енергоспоживання та забезпечити стабільність технологічного процесу.

Отримані результати можуть бути використані на зерноочисних підприємствах агропромислового комплексу, елеваторах та зернопереробних комплексах для підвищення техніко-економічної ефективності процесів післязбиральної обробки зерна.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Бабенко В. О. Механізація післязбиральної обробки зерна : підручник. Київ : Аграрна освіта, 2016. 412 с.
1. Василенко П. М. Машини та обладнання для післязбиральної обробки зерна. Київ : Вища школа, 2013. 480 с.
2. Погорілий Л. В. Машини для очищення і сортування зерна. Київ : Урожай, 2010. 384 с.
3. Бойко І. М. Пневмосепараційні процеси в зерноочисних машинах : монографія. Харків : ХНАУ, 2017. 256 с.
4. Барабаш В. М. Технології зберігання і переробки зерна. Київ : Урожай, 2014. 368 с.
5. Гаврилюк М. М. Проектування зерноочисних і сушильних комплексів. Львів : НУБіП, 2018. 295 с.
6. Жуков В. П. Аспіраційні системи зернопереробних підприємств. Москва : Колос, 2012. 320 с.
7. Зайцев С. В. Процеси пневматичного транспортування сипких матеріалів. Київ : Техніка, 2015. 274 с.
8. Хоменко В. С. Аспірація та пиловловлювання в агропромисловості. Дніпро : Нова ідея, 2016. 188 с.
9. Цапко В. Г. Системи пиловидалення на елеваторах // Енергетика АПК. 2018. № 5. С. 33–38.
10. Міщенко В. О. Проектування аспіраційних мереж елеваторів // Вісник ХНТУСГ. 2019. № 198. С. 75–82.
11. Гапоненко О. І. Енергоефективні технології очищення зерна // Вісник аграрної науки. 2020. № 4. С. 52–58.
12. Кравченко О. П. Сучасні зерноочисні комплекси та їх модернізація // Техніка АПК. 2021. № 7. С. 21–27.
13. Левченко Ю. В. Механізація технологічних процесів у зернопереробці. Полтава : ПДАУ, 2022. 198 с.

14. Тарасенко Є. Г. Моделювання пневмосепараційних процесів. Київ : НУБіП, 2020. 243 с.
15. Степаненко С. П., Базалук О. В. Дослідження процесу повітряної сепарації зернового матеріалу // *Journal of Central European Agriculture*. 2023. Vol. 24, No. 3. P. 455–468.
16. Bazaluk O. et al. Improving Energy Efficiency of Grain Cleaning Technology // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, No. 10. 5190.
17. GEAPS. Grain Cleaning and Drying Systems Handbook. USA, 2018. 144 p.
18. FAO. Grain Handling and Storage Systems. Rome : Food and Agriculture Organization, 2016. 210 p.
19. KMZ Industries. Grain Cleaning, Drying and Aspiration Systems Catalogue. Karlivka, 2022. 96 p.
20. Petkus Technologie GmbH. Grain Cleaning Equipment Catalogue. Germany, 2020. 124 p.
21. ZEO. Системи аспірації елеваторів та зерносушарок. 2023.
22. Autonics Corporation. CT Series Counter/Timer User Manual. Busan, South Korea, 2021. 85 p.
23. UNI-T. Digital Sound Level Meter UT353BT User Manual. Shenzhen, China, 2022. 42 p.
24. WILE. Grain Moisture Meter WILE-35 Technical Documentation. Finland, 2019. 36 p.
25. ДСТУ 3768:2019. Пшениця. Технічні умови. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 18 с.
26. ДСТУ EN 60204-1:2015. Безпечність машин. Електрообладнання машин. Частина 1. Загальні вимоги. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 142 с.
27. ISO 22000:2018. Food safety management systems – Requirements for organizations in the food chain. Geneva : ISO, 2018. 38 p.
28. Правила охорони праці у зерновому господарстві. Київ : Держпраці, 2020. 96 с.
29. Сидоренко О. М. Екологічна безпека зернопереробних підприємств. Харків : ХНУБА, 2019. 214 с.

30. Методичні рекомендації з визначення економічної ефективності інвестицій. Київ : Мінекономіки України, 2011. 54 с.
31. Нормативи питомих витрат електроенергії на очищення та сушіння зерна. Київ : Мінагрополітики України, 2018. 24 с.
32. Технологічні регламенти роботи зерносушильних комплексів. Київ : Мінагрополітики України, 2019. 62 с.
33. Даниляк А. С. Аспіраційні системи елеваторів : бакалаврська робота. Львів, 2023. 68 с.
34. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 16 с.
35. Гуменюк М. П. Основи автоматизації технологічних процесів зернопереробки. Київ : Аграрна наука, 2018. 286 с.
36. Коваленко В. І. Теоретичні основи роботи вентиляторних систем. Харків : Факт, 2015. 214 с.
37. Мартиненко С. О. Дослідження аеродинамічних характеристик пневмосепараторів // Вісник аграрної інженерії. 2021. № 12. С. 44–51.
38. Петренко І. С. Енергозберігаючі режими роботи зерноочисних машин. Дніпро : Акцент, 2019. 176 с.
39. Соловйов В. В. Автоматизовані системи керування технологічними процесами. Київ : Техніка, 2017. 352 с.
40. Черненко А. М. Основи технічної діагностики машин та обладнання. Полтава : ПДАУ, 2020. 204 с.
41. Руденко П. І. Системи автоматичного контролю в агропромисловому комплексі. Харків : ХНТУСГ, 2016. 248 с.
42. Дудник О. В. Дослідження шумових характеристик зерноочисного обладнання // Техніка і технології АПК. 2022. № 3. С. 38–44.
43. Климчук В. П. Пневматичні транспортні системи зернопереробних підприємств. Київ : Урожай, 2015. 318 с.
44. Іванченко О. С. Теорія та практика сепарації зернових матеріалів. Харків : ХНАУ, 2018. 292 с.

45. Мельник Р. М. Технологічне обладнання елеваторів і зернопереробних комплексів. Львів : Сполом, 2021. 334 с.
46. Базилевич А. І. Системи моніторингу технологічних процесів у сільському господарстві. Київ : НУБіП, 2019. 268 с.
47. Паламарчук В. І. Основи віброакустичної діагностики машин. Дніпро : Ліра, 2017. 212 с.
48. Литвиненко С. Г. Проектування систем аспірації та вентиляції. Одеса : Астропринт, 2016. 196 с.
49. Савченко П. І. Системи електропривода зерноочисного обладнання. Київ : Техніка, 2020. 284 с.
50. ISO 12100:2010. Safety of Machinery – General Principles for Design – Risk Assessment and Risk Reduction. Geneva : ISO, 2010. 82 p.
51. EN 12779:2015. Safety of woodworking machines – Chip and dust extraction systems with fixed installation – Safety requirements. Brussels : European Committee for Standardization, 2015. 74 p.