

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ГЕОДЕЗІЇ, ЗЕМЛЕУСТРОЮ ТА АГРОІНЖЕНЕРІЇ
КАФЕДРА АГРОІНЖЕНЕРІЇ

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
д.т.н., професор

_____ Костянтин ДЯДЮРА

« ____ » _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти «першого (бакалаврського) рівня»
освітньої програми «Агроінженерія»
за спеціальністю 208 «Агроінженерія»

МОДЕРНІЗАЦІЯ ЗЕРНОЗБИРАЛЬНОГО КОМБАЙНА З СИСТЕМОЮ АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ ВТРАТ ЗЕРНА

Науковий керівник: професор, д.т.н.
_____ Костянтин ДЯДЮРА

Рецензент: к.т.н.
_____ Сергій ЛІНКЕВИЧ

Виконав здобувач першого (бакалаврського) рівня
вищої освіти заочної форми навчання освітньо-
професійної програми «Агроінженерія»
спеціальності 208 «Агроінженерія»
Віталій БАБАК

*Засвідчую, що кваліфікаційна робота містить
результати власних досліджень. Використання
ідей і текстів інших авторів має посилання на
відповідне джерело.*

_____ Віталій БАБАК

ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет геодезії, землеустрою та агроінженерії

Кафедра агроінженерії

Рівень вищої освіти другий (магістр)

Галузь знань 20 Аграрні науки та продовольство

Спеціальність 208 «Агроінженерія»

Освітня програма Агроінженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри агроінженерії

Костянтин ДЯДЮРА

«___» _____ 2026 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ

Віталій БАБАК

1. Тема кваліфікаційної роботи:

«Модернізація зернозбирального комбайна з системою автоматичного контролю втрат зерна»

науковий керівник кваліфікаційної роботи: професор, д.т.н. Дядюра Костянтин Олександрович

затверджені наказом ректора Одеського державного аграрного університету № 118 від « 05 » _____ 09 _____ 2025 р.

2. Строк подання здобувачем кваліфікаційної роботи 15 червня 2026 року.

3. **Об'єкт дослідження:** процеси обмолоту, сепарації та очищення зернової маси в зернозбиральному комбайні, а також системи автоматичного контролю технологічних втрат зерна.

4. **Предмет дослідження:** параметри, конструкція та алгоритмічне забезпечення системи автоматичного контролю втрат зерна на базі п'єзоелектричних датчиків, інтегрованої в бортову мережу комбайна за стандартом ISO 11783 (ISOBUS)

5. **Перелік завдань, які потрібно розробити:**

5.1. Теоретико-методичний розділ: проаналізувати особливості інтеграції мехатронних систем у кіберфізичний комплекс комбайна за стандартом ISO 11783 (ISOBUS)

5.2. Дослідницько-аналітичний розділ: розробити математичну модель динамічної взаємодії зернівки з чутливим елементом п'єзоелектричного датчика; розробити математичну модель адаптивного керування поступальною швидкістю комбайна за критерієм допустимих втрат

5.3. Проєктно-рекомендаційний розділ: виконати розрахунок параметрів електронного блоку збору та первинної обробки сигналів (БКВЗ); виконати 3D-моделювання модернізованих елементів та загальну компоновку системи

6. Орієнтовний перелік графічного та табличного матеріалу:

6.1. До теоретико-методичного розділу:

системи автоматичного моніторингу втрат зерна; мехатронна система комбайна за стандартом ISO 11783

6.2. До дослідницько-аналітичного розділу:

математичне моделювання динамічної взаємодії зернівки з чутливим елементом п'єзоелектричного датчика; математична модель адаптивного керування поступальною швидкістю комбайна

6.3. До проєктно-рекомендаційного розділу:

просторове розміщення датчиків на виході соломотряса та решітного стану; конструкція вузла кріплення датчика

7. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:

Вимоги до систем автоматичного контролю втрат зерна згідно з ISO 11783 (ISOBUS); фізико-механічні властивості зернових культур (пшениця, ячмінь, кукурудза): маса зернівки 20–350 мг, швидкість потоку 5–15 м/с

9. Дата видачі завдання: « 27 » _____ 09 _____ 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	Кількість кредитів	Примітка
1.	Визначення теми, об'єкта та предмета дослідження	Лютий 2026	0,25	
2.	Отримання завдання і складання змісту кваліфікаційної роботи	Лютий 2026	0,25	

3.	Складання календарного плану – графіку з підготовки кваліфікаційної роботи	Березень 2026	0,5	
4.	Написання першого розділу кваліфікаційної роботи	Березень 2026	2,0	
5.	Вивчення матеріалів базових підприємств	Квітень 2026	1,0	
6.	Написання другого розділу кваліфікаційної роботи	Квітень 2026	2,0	
7.	Написання третього розділу кваліфікаційної роботи	Травень 2026	3,0	
8.	Написання висновків, списку літератури	Травень 2026	0,5	
9.	Перевірка кваліфікаційної роботи науковим керівником	Червень 2026		
10.	Доопрацювання роботи після зауважень наукового керівника	Червень 2026	0,5	
11.	Підготовка до захисту: доповідь, ілюстративний матеріал	Червень 2026	0,5	
12.	Подання кваліфікаційної роботи на кафедру	15 червня 2026		
13.	Перевірка кваліфікаційної роботи на оригінальність	Червень 2026		
14.	Попередній захист на кафедрі	Червень 2026		
15.	Рецензування кваліфікаційної роботи	Червень 2026		
16.	Захист кваліфікаційної роботи	18-20 червня 2026	1,5	
	Загальна кількість		12	

Здобувач ОС бакалавр

_____ Віталій БАБАК

Науковий керівник

_____ Костянтин ДЯДЮРА

Гарант ОП

_____ Дмитро ДОМУЩІ

РЕФЕРАТ

Дипломний проект містить: 104 сторінок, 18 рисунків, 12 таблиць, 17 джерела за переліком посилань.

Об'єкт дослідження: процеси обмолоту, сепарації та очищення зернової маси в зернозбиральному комбайні, а також системи автоматичного контролю технологічних втрат зерна.

Мета роботи: підвищення ефективності збирання зернових культур шляхом модернізації зернозбирального комбайна системою автоматичного контролю втрат зерна з використанням п'єзоелектричних датчиків, адаптивної фільтрації сигналів та інтеграції в бортову мережу за стандартом ISO 11783 (ISOBUS).

Методи дослідження: аналітичний огляд науково-технічної літератури; математичне моделювання динамічної взаємодії зернівки з чутливою пластиною; моделювання розподілу деформацій методом скінченних елементів; розробка алгоритмів адаптивної фільтрації (LMS) та рекурсивної ідентифікації (RLS); інженерні розрахунки електронних вузлів.

Отримані результати: Розраховано параметри п'єзоелектричного датчика втрат зерна. Розроблено електронний блок збору та первинної обробки сигналів (БКВЗ) на мікроконтролері STM32F407VET6. Реалізовано адаптивний LMS-фільтр із придушенням вібраційних завад на 20–30 дБ. Час монтажу на комбайні – 4–6 годин.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ЗЕРНОЗБИРАЛЬНИЙ КОМБАЙН, ВТРАТИ ЗЕРНА, АВТОМАТИЧНИЙ КОНТРОЛЬ, П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИЙ ДАТЧИК, ISO 11783 (ISOBUS), АДАПТИВНЕ КЕРУВАННЯ, ЧАСТОТНА ФІЛЬТРАЦІЯ, ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ.

					14.17 - КР.014.0.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РЕФЕРАТ	Літ.	Аркуш	Аркушів
Розроб.		Бабак						
Перевір.		Дядюра К. О.					5	1
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						

ЗМІСТ

	С.
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 СТАН ПИТАННЯ ТА ОГЛЯД СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО МОНІТОРИНГУ ВТРАТ ЗЕРНА В ЗЕРНОЗБИРАЛЬНИХ КОМБАЙНАХ	11
1.1 Аналіз технологічного процесу обмолоту та сепарації як основних джерел втрат зернової маси.....	11
1.2 Системи автоматичного моніторингу втрат зерна: огляд сучасного стану	15
1.3 Сучасні автоматизовані системи керування комбайнами з моніторингом втрат	18
Висновки.....	29
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ ВТРАТ ЗЕРНА.....	31
2.1 Математичне моделювання динамічної взаємодії зернівки з чутливим елементом п'єзоелектричного датчика.....	31
2.2 Енергетичний та інформаційний баланси: взаємодія технічних систем	41
2.3 Обґрунтування алгоритмів частотної фільтрації для запобігання розстроювання калібрувальних характеристик системи в умовах структурних вібрацій комбайна.....	47
2.4 Математична модель адаптивного керування поступальною швидкістю комбайна за критерієм допустимих втрат.....	49
Висновки.....	55
РОЗДІЛ 3. ІНЖЕНЕРНИЙ РОЗРАХУНОК ТА ПРОЄКТУВАННЯ КОМПОНЕНТІВ МОДЕРНІЗОВАНОГО КОМБАЙНА.....	57
3.1 Обґрунтування просторового розміщення та конструкції вузлів	57

кріплення датчиків на виході соломотряса та решітного стану.....					14.17 - КР.014.0.000 ПЗ		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.	Бабак				ЗМІСТ	Літ.	Аркуш
Перевір.	Дядюра К. О.						Аркушів
Реценз.						6	2
Н. Контр.							
Затверд.	Дядюра К. О.						

3.2 Розрахунок параметрів електронного блоку збору та первинної обробки сигналів.....	62
3.3 Розробка функціональної та електричної схем інтеграції системи контролю в бортову мережу.....	66
3.4 3D-моделювання модернізованих елементів очистки та загальна компоновка системи.....	71
Висновки.....	77
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	79
4.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів під час експлуатації та обслуговування зернозбиральних комбайнів.....	79
4.2 Заходи безпеки при монтажі та налаштуванні мікропроцесорних	84
Висновки.....	89
РОЗДІЛ 5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ МОДЕРНІЗАЦІЇ.....	91
5.1 Розрахунок капітальних витрат на придбання, виготовлення компонентів та монтаж системи контролю витрат.....	91
5.2 Визначення річної економії зерна за рахунок оперативного оптимізації режимів роботи комбайна.....	94
5.3 Оцінка показників економічної ефективності та терміну окупності витрат на модернізацію.....	99
Висновки.....	99
ВИСНОВКИ.....	100
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	103

ВСТУП

Актуальність теми. Зерновиробництво є стратегічною галуззю сільського господарства України, що забезпечує значну частку експортних надходжень та продовольчу безпеку держави. За даними Держстату, валовий збір зернових культур в Україні у 2025 році перевищив 60 млн тонн, однак, за оцінками фахівців, втрати зерна під час збирання становлять від 5 до 18% від вирощеного врожаю. Основними причинами таких значних втрат є недосконалість технологічних процесів обмолоту та сепарації в зернозбиральних комбайнах, а також недостатній рівень автоматизації контролю за цими процесами.

Аналіз конструкцій сучасних зернозбиральних комбайнів свідчить, що навіть технічно справні машини класичних моделей не оснащені системами оперативного моніторингу втрат зерна, а їх налаштування здійснюються перед початком збирання і не змінюються в процесі роботи. Водночас провідні світові виробники (CLAAS, John Deere, New Holland) впроваджують інтелектуальні системи контролю втрат (CEMOS AUTOMATIC, Harvest Settings Automation, IntelliSense), які дозволяють зменшити втрати зерна на 15–33% та підвищити продуктивність на 7–25%.

Таким чином, актуальним науково-прикладним завданням є розроблення доступної, технологічної та ефективної системи автоматичного контролю втрат зерна для модернізації існуючих зернозбиральних комбайнів. Запропонована система повинна базуватися на використанні недорогих п'єзоелектричних датчиків, мікроконтролерної обробки сигналів та інтеграції в бортову мережу комбайна за стандартом ISOBUS.

Мета та завдання дослідження. Метою кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності збирання зернових культур шляхом модернізації зернозбирального комбайна системою автоматичного контролю втрат зерна.

					14.17 - КР.014.0.000 ПЗ						
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Бабак			ВСТУП			Літ.	Аркуш	Аркушів	
Перевір.		Дядюра К. О.							8	3	
Реценз.											
Н. Контр.											
Затверд.		Дядюра К. О.									

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі *завдання*:

1. Виконати аналіз технологічного процесу обмолоту та сепарації як основних джерел втрат зернової маси, а також провести критичний огляд існуючих конструкцій датчиків втрат зерна (п'єзоелектричних, акустичних, оптичних) та стандартів інтеграції мехатронних систем (ISO 11783).

2. Теоретично обґрунтувати параметри системи автоматичного контролю втрат зерна, зокрема: розробити математичну модель динамічної взаємодії зернівки з чутливим елементом п'єзоелектричного датчика; дослідити енергетичний та інформаційний баланси взаємодії технічних підсистем комбайна; обґрунтувати алгоритми частотної фільтрації для компенсації вібраційних завад; розробити математичну модель адаптивного керування швидкістю комбайна за критерієм допустимих втрат.

3. Виконати інженерний розрахунок та проєктування компонентів модернізованого комбайна, включаючи просторове розміщення та вузли кріплення датчиків, параметри електронного блоку збору та первинної обробки сигналів, функціональну та електричну схеми інтеграції в бортову мережу, а також 3D-моделювання вузлів системи.

4. Розробити заходи з охорони праці та пожежної безпеки при монтажі, експлуатації та обслуговуванні системи контролю втрат зерна.

5. Провести техніко-економічне обґрунтування модернізації, визначити капітальні витрати, річну економію зерна та показники економічної ефективності.

Об'єкт дослідження – процеси обмолоту, сепарації та очищення зернової маси в зернозбиральному комбайні, а також системи автоматичного контролю технологічних втрат зерна.

Предмет дослідження – параметри, конструкція та алгоритмічне забезпечення системи автоматичного контролю втрат зерна на базі п'єзоелектричних датчиків, інтегрованої в бортову мережу комбайна за стандартом ISO 11783.

					14.17 - КР.014.0.000 ПЗ	Аркуш
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Методи дослідження. У роботі використано комплексний підхід, що включає: аналітичний огляд та узагальнення науково-технічної літератури; методи математичного моделювання (теорія контактної взаємодії Герца, рівняння згинальних коливань тонких пластин, теорія п'єзоелектричного ефекту, спектральний аналіз, методи адаптивної фільтрації LMS та рекурсивної ідентифікації RLS); методи імітаційного моделювання; інженерні розрахунки на міцність та вібростійкість; 3D-моделювання (SolidWorks); методи техніко-економічного аналізу (розрахунок NPV, терміну окупності, IRR).

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено комплекс конструкторсько-технологічної документації для модернізації зернозбиральних комбайнів системою автоматичного контролю втрат зерна, зокрема:

- конструкції вузлів кріплення п'єзоелектричних датчиків під соломотрясом та на решітному стані;
- принципову електричну схему та специфікацію компонентів електронного блоку БКВЗ;
- алгоритми цифрової обробки сигналів (LMS-фільтрація, спектральний аналіз, підрахунок імпульсів);
- протокол обміну даними по CAN-шині сумісний з ISO 11783 (ISOBUS);
- 3D-моделі основних вузлів системи.

					14.17 - КР.014.0.000 ПЗ	Аркуш
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ ТА ОГЛЯД СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО МОНІТОРИНГУ ВТРАТ ЗЕРНА В ЗЕРНОЗБИРАЛЬНИХ КОМБАЙНАХ

1.1. Аналіз технологічного процесу обмолоту та сепарації як основних джерел втрат зернової маси

Збирання зернових культур є одним із найбільш відповідальних і енергоємних етапів у сільськогосподарському виробництві. Саме на цьому етапі зосереджено 50...55% усіх матеріально-технічних і енергетичних витрат. За оцінками фахівців, втрати вирощеного врожаю в Україні сягають 7–8 млн тонн, що становить 16–18% від валового збору. Домінуючою причиною таких значних втрат є, зокрема, недосконалість технологічних процесів у молотарці комбайна, а також недостатній рівень автоматизації та контролю за перебігом цих процесів. Основними джерелами втрат у комбайні є системи обмолоту й сепарації (рисунок 1.1).

Аналіз технологічного процесу обмолоту

Обмолот — це процес відокремлення зерна від колосу (качана) шляхом механічного впливу робочих органів молотильного пристрою. У зернозбиральних комбайнах класичної схеми обмолот здійснюється бильним барабаном і клавішним соломотрясом. Барабан, обертаючись із високою лінійною швидкістю (зазвичай $400\text{--}550\text{ хв}^{-1}$ для зернових культур), разом із підбарабанням утворює молотильний зазор, у якому відбувається інтенсивне вимолочування зерна.

					14.17 - КР.014.1.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Бабак				РОЗДІЛ 1	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевір.	Дядюра К. О.						11	18
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.	Дядюра К. О.							

'АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ОБМОЛОТУ ТА СЕПАРАЦІЇ ЯК ОСНОВНИХ ДЖЕРЕЛ ВТРАТ ЗЕРНОВОЇ МАСИ'

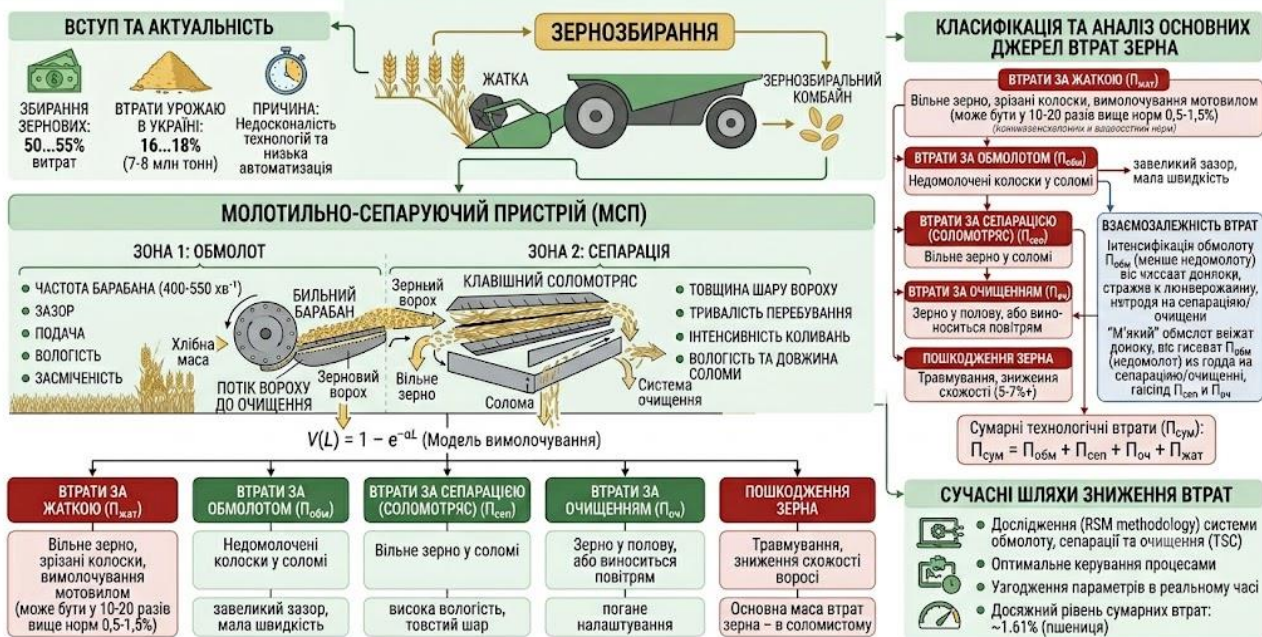


Рисунок 1.1 – Аналіз технологічного процесу обмолоту

Характер протікання процесу обмолоту визначається низкою факторів: частотою обертання барабана, величиною зазору між барабаном і підбарабанням, подачею хлібної маси, вологістю та засміченістю вороху, а також сортовими особливостями культури. Так, дослідженнями встановлено, що збільшення частоти обертання барабана на 100 хв⁻¹ (з 450 до 550 хв⁻¹) призводить до зростання пошкоджень зерна з 1,5% до 5,5%, тобто майже вчетверо. Водночас надмірне зменшення частоти обертання або збільшення зазору загрожує появою недомолочених колосків — так званих «втрат за обмолотом».

Важливим показником якості обмолоту є коефіцієнт вимолочування, що визначається як відношення маси вимолоченого зерна до загальної маси зерна, що надійшло в молотарку. Для класичних молотильних пристроїв цей коефіцієнт на початковій ділянці підбарабання може сягати 60–80% всієї маси зерна, що підкреслює виняткову інтенсивність процесу в першій зоні. Подальша сепарація зерна відбувається вздовж усієї довжини підбарабання та на клавішному соломотрасі.

Аналіз технологічного процесу сепарації

Сепарація — це процес виділення вільного зерна з соломистого вороху, що залишається після обмолоту. У комбайнах класичної схеми сепарація реалізується за допомогою клавійного соломотряса, який здійснює коливальний рух і пошарово переміщує ворох до виходу з молотарки. Через отвори в клавішах провалюється дрібна фракція (зерно, полова, дрібні домішки), яка потрапляє на систему очищення, тоді як солома виноситься назовні.

Ефективність сепарації залежить від багатьох чинників: товщини шару вороху, тривалості перебування маси на соломотрясі, інтенсивності коливань, вологості та довжини соломи. Дослідження показують, що основна маса втрат зерна комбайнами з класичним молотильно-сепаруючим пристроєм відбувається в соломистому воросі, особливо при збиранні перестійних хлібів або культур із високим вмістом води. Це пов'язано з тим, що в соломотряс зерно може «застрягати» в масі грубої соломи та не встигнути провалитися крізь отвори за час руху ворохом.

Класифікація та аналіз основних джерел втрат зерна

Усі втрати зерна за комбайнового збирання прийнято поділяти на дві великі групи: технологічні (пов'язані з роботою комбайна) та біологічні (пов'язані з осипанням перезрілих культур до обмолоту). Щодо технологічних втрат, то їх основними каналами є [3, 4]:

- Втрати за жаткою — втрати вільного зерна та зерна в незрізаних стеблах, зрізаних і втрачених колосках, а також вимолочування зерна мотовилом. За певних умов рівень втрат урожаю за жаткою в 10–20 разів може перевищувати допустимі показники (0,5–1,5%).

- Втрати за обмолотом — недомолочені колоски, що виходять із молотильного пристрою разом із соломою. Цей вид втрат з'являється, коли молотильний зазор перевищує оптимальний розмір або частота обертання барабана недостатня для даної культури.

- Втрати за сепарацією (на соломотрясі) — вільне зерно, що залишається в соломі після проходження соломотряса. Такі втрати часто є найбільшими серед усіх

					14.17 - КР.014.1.000 ПЗ	Аркуш
						13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

технологічних втрат, особливо за підвищеної вологості та поганої текучості вороху.

– Втрати за очищенням — зерно, що виноситься повітряним потоком назовні разом із легкими домішками, або провалюється крізь решета в половину. Втрати за очищенням особливо відчутні за неправильного налаштування решіт, вентилятора та напрямку повітряного потоку.

– Пошкодження (травмування) зерна — механічне пошкодження зернівок у процесі обмолоту, що знижує їхню схожість і продовольчі якості. Кількість механічно пошкодженого зерна різними комбайнами може досягати 5–7% і більше.

Слід зазначити, що втрати за обмолотом і сепарацією є взаємопов'язаними: зазвичай збільшення інтенсивності обмолоту (наприклад, зменшення зазору або збільшення частоти обертання) зменшує недомолот, але призводить до зростання пошкоджень зерна, а також до інтенсифікації дроблення соломи та збільшення навантаження на систему очищення. У свою чергу, надмірно «м'який» режим обмолоту дає малу кількість пошкоджень, але збільшує недомолот і підвищує навантаження на соломотряс і очищення, що може спричинити зростання втрат за сепарацією та очищенням [5, 6].

Аналітичні залежності, що описують втрати зерна

Для кількісного оцінювання та прогнозування втрат зерна застосовують математичні моделі, що описують процеси обмолоту та сепарації. Найбільш поширеними є стохастичні (ймовірнісні) моделі, у яких процеси вимолочування та сепарації описуються експоненціальними функціями вздовж довжини молотильного простору [6,7].

Загальна модель вимолочування може бути подана у вигляді:

$$F_{th}(x) = 1 - e^{-k_{th} \cdot x}, \quad (1.1)$$

де: $F_{th}(x)$ — частка вимолоченого зерна на довжині підбарабання x ; k_{th} — коефіцієнт інтенсивності обмолоту, що залежить від конструктивних параметрів молотильного пристрою, частоти обертання барабана, величини зазору та властивостей культури.

					14.17 - КР.014.1.000 ПЗ	Аркуш
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Модель сепарації вільного зерна через клавішний соломотряс аналогічно описується експоненціальним законом:

$$F_{\text{sep}}(x) = 1 - e^{-k_{\text{sep}} \cdot x}, \quad (1.2)$$

де: $F_{\text{sep}}(x)$ — частка відокремленого вільного зерна на довжині сепаруючого пристрою; k_{sep} — коефіцієнт інтенсивності сепарації, що залежить від частоти й амплітуди коливань клавіш, товщини шару вороху та властивостей культури.

Сумарні технологічні втрати за комбайном (L_{total}) можна подати як:

$$L_{\text{total}} = L_{\text{threshing}} + L_{\text{sep}} + L_{\text{cleaning}} + \Delta L_{\text{header}}, \quad (1.3)$$

де: $L_{\text{threshing}}$ — втрати за обмолотом, пов'язані з недомолоченими колосками; L_{sep} — втрати за сепарацією, зумовлені невиділенням вільним зерном; L_{cleaning} — втрати за очищенням; ΔL_{header} — втрати за жаткою.

Сучасні дослідження, зокрема з використанням методології поверхні відгуку (response surface methodology, RSM) для системи обмолоту, сепарації та очищення (TSC) зернозбиральних комбайнів, показують, що оптимальне керування технологічним процесом дозволяє досягти сумарних втрат зерна на рівні 1,61% при роботі з пшеницею. Водночас такий низький рівень досягається лише за умови точного узгодження всіх регульовальних параметрів, які змінюються в реальному часі залежно від умов збирання [8].

1.2 Системи автоматичного моніторингу втрат зерна: огляд сучасного стану

Для оперативного контролю за втратами зерна та своєчасної корекції параметрів комбайна застосовують системи автоматичного моніторингу втрат зерна. За даними сенсорних систем, водій отримує інформацію про рівень втрат у реальному часі, що є ключовим чинником для динамічного регулювання робочих параметрів (рисунок 1.2).

Класифікація датчиків втрат зерна

За принципом дії системи моніторингу поділяються на:

1. *П'єзоелектричні датчики* — найпоширеніший тип датчиків втрат зерна. Вони реагують на механічний удар зернівки (або іншої частки) об чутливу пластину, генеруючи електричний сигнал. Амплітуда, частота та тривалість сигналу залежать від маси, швидкості та кута удару частинки, що дає змогу диференціювати удар зерна від удару легких домішок. Застосовуються матеріали з п'єзоелектричними властивостями: кварц, кераміка (наприклад, цирконат-титанат свинцю, PZT), а також полімерні плівки (PVDF), які мають високу гнучкість і швидкодію.



Рисунок 1.2 – Системи автоматичного моніторингу втрат зерна

Одна з найновіших розробок у цій сфері — датчик на основі оптимізації вібраційних характеристик чутливої пластини, де на основі теорії тонких пластин Кірхгофа та модального аналізу визначено оптимальну форму (круглу нержавіючу пластину), матеріал та геометрію пластини. Запропонований у цьому дослідженні датчик демонструє високу точність вимірювань завдяки FFT-обробці сигналу (смуговий фільтр 1,0–3,0 кГц, поріг напруги 3,5 В).

2. Оптичні та відеосистеми — використовують камери та алгоритми комп'ютерного зору для безпосереднього підрахунку зерен, що випадають із потоку. До таких систем належить німецька система Yield EyeQ від Geringhoff, яка отримала срібну медаль Agritechnica. Вона використовує одну або дві камери високої роздільної здатності, розташовані між жаткою та комбайном, що дає змогу виявляти втрати зерна вже на етапі роботи жатки. За оцінками розробника, неправильно налаштована жатка може спричинити до 40% усіх втрат зерна залежно від культури та умов. Канада-базована Farmwave використовує камери Luxonis OAK-D-PoE на жатці та ззаду комбайна для підрахунку зерен на основі вбудованих алгоритмів машинного навчання.

3. Гібридні системи — поєднують різні типи сенсорів для підвищення точності та стійкості до перешкод. Наприклад, Bushel Plus SmartPan інтегрується з системами автоматизації John Deere, надаючи еталонні дані для калібрування сенсорів втрат.

Порівняльний аналіз та інтегральна оцінка

Для систематизації отриманих даних і полегшення вибору сенсорної технології для конкретних умов експлуатації доцільно представити результати порівняльного аналізу у вигляді зведеної таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика датчиків втрат зерна

Критерій	П'єзоелектричні (PZT/PVDF)	Акустичні	Оптичні (машинний зір)
Фізичний принцип	Ударна механічна дія → електричний сигнал	Удар → звукова хвиля → мікрофон	Візуальне зображення → нейромережевий аналіз
Похибка вимірювання	3–8% [16]	~6,1% [10]	До 91,6% точності ідентифікації [26]
Розрізнення зерно/солома	Складне (за амплітудою, алгоритмами ШП)	Можливе за частотою (зерно 15 кГц, солома 7 кГц)	Пряме візуальне (навчена модель)
Основна перевага	Низька вартість, простота, компактність	Нечутливість до вібрацій корпусу	Пряме виявлення, абсолютні значення

Критерій	П'єзоелектричні (PZT/PVDF)	Акустичні	Оптичні (машинний зір)
Основний недолік	«Фантомні» показання, не бачить зерно в соломі	Висока чутливість до шуму навколишнього середовища	Висока вартість, чутливість до запилення
Потреба в калібруванні	Критично важлива (інакше немає абсолютних значень)	Помірна (залежить від частоти)	Мінімальна (навчена модель)
Стійкість до вібрацій	Низька (потрібна віброізоляція)	Висока	Висока (за умови стабілізації камери)
Стійкість до пилу/вологості	PVDF чутливий до вологості; PZT стабільніший	Потребує захисту акустичної камери	Потребує регулярного очищення об'єктива
Вартість	Низька–середня	Середня	Висока (€9 000–12 000)
Приклади реалізації	John Deere S600/X9, наукові прототипи	Fendt IDEAL (Acoustic MAD), лабораторні розробки	Farmwave, Yield EyeQ, Grain Quality Monitor
Перспективність	Висока за умови вдосконалення алгоритмів	Помірна (через чутливість до шуму)	

1.3 Сучасні автоматизовані системи керування комбайнами з моніторингом втрат

Провідні виробники сільськогосподарської техніки пропонують інтелектуальні системи, які не тільки вимірюють втрати зерна, але й автоматично регулюють робочі параметри комбайна для їх мінімізації (рисунок 1.3):

– CEMOS AUTOMATIC (CLAAS) — самонавчальна система підтримки оператора, яка враховує задані користувачем критерії якості зерна та допустимого рівня втрат. Під час збирання система автоматично оптимізує роботу комбайна відповідно до заданих критеріїв. Функція CEMOS AUTO SEPARATION безперервно оптимізує вторинну сепарацію в гібридних

					14.17 - КР.014.1.000 ПЗ	Аркуш
						18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

комбайнах CLAAS, автоматично підлаштовуючи частоту обертання ротора та положення роторної заслінки під зміни умов збирання. Випробування на CLAAS LEXION 770 показали, що застосування CEMOS AUTOMATIC покращує паливну ефективність на 7–10%, зменшує втрати зерна на 15–20% та забезпечує стабільнішу роботу машини порівняно з ручним керуванням.



Рисунок 1.3 – Сучасні автоматизовані системи керування комбайнами

– Harvest Settings Automation (John Deere) — автоматично встановлює п'ять ключових налаштувань комбайна (зазор деки, частоту обертання вентилятора та ротора, зазори решіт і стрясної дошки) на основі заданих оператором лімітів щодо втрат зерна, вмісту сторонніх домішок і битого зерна. Система використовує камери ActiveVision разом із датчиками втрат зерна для визначення впливу змін стану культури та автоматичного коригування машини.

– IntelliSense (New Holland) — інтелектуальна система, яка реагує на зміни умов кожні 20 секунд і вибирає оптимальну дію для підвищення продуктивності. За даними виробника, вона забезпечує на 25% більшу пропускну здатність і на 33% менші втрати зерна. Система автоматично оптимізує налаштування

обмолоту, сепарації та очищення для зменшення втрат зерна, підвищення його якості та зниження витрати пального.

На основі проведеного аналізу технологічних процесів обмолоту та сепарації, а також огляду систем автоматичного моніторингу втрат зерна, можна зробити такі висновки:

1. Втрати зерна є комплексною проблемою, зумовленою сукупною дією багатьох факторів: конструктивних параметрів молотильно-сепаруючого пристрою, режимів роботи комбайна (частота обертання барабана, величина зазору, швидкість руху, налаштування решіт і вентилятора), а також властивостей культури (вологість, засміченість, сорт, фаза стиглості) та умов збирання. Основні втрати зерна (до 20–30% і більше) виникають через обмолот і сепарацію. Це підтверджує доцільність модернізації саме цих систем із впровадженням автоматичного контролю втрат.

2. Сучасні системи моніторингу втрат зерна базуються переважно на п'єзоелектричних датчиках, які забезпечують прийнятну точність (похибка 6–8% за очищенням, точність до 94% для кукурудзи), однак мають фізичні обмеження — зокрема, насичення при високій інтенсивності ударів і проблеми з розрізненням зерна та легких домішок.

3. Прогресивним напрямом є поєднання п'єзоелектричних сенсорів із системами комп'ютерного зору та алгоритмами штучного інтелекту (Yield EyeQ, Farmwave, SmartPan), що дає змогу підвищити точність і стійкість до перешкод. Крім того, оптимізація структури чутливої пластини (наприклад, кругла нержавіюча пластина замість традиційної прямокутної) може суттєво покращити чутливість сенсора.

4. Сучасні автоматизовані системи (CLAAS CEMOS AUTOMATIC, John Deere Harvest Settings Automation, New Holland IntelliSense) не лише вимірюють рівень втрат, але й автоматично підлаштовують параметри роботи комбайна в реальному часі. Вони здатні зменшувати втрати зерна до 0,1–0,2% у складних умовах (CLAAS) або досягати сумарних втрат на рівні 1,61% для пшениці (за даними оптимізаційних моделей).

					14.17 - КР.014.1.000 ПЗ	Аркуш
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5. Невирішеними проблемами залишаються: недостатня точність п'єзодатчиків за високої інтенсивності потоку; складність калібрування сенсорів під різні культури та умови; відсутність уніфікованих підходів до інтеграції систем моніторингу втрат у загальну систему керування комбайном. Саме ці аспекти визначають напрями подальших досліджень та модернізації, що й буде реалізовано в наступних розділах кваліфікаційної роботи.

Особливості інтеграції мехатронних систем у кіберфізичний комплекс комбайна за стандартом ISO 11783 (ISOBUS).

Передумови виникнення та філософія стандарту ISOBUS.

Сучасний зернозбиральний комбайн являє собою складну мехатронну систему, що поєднує механічні вузли, гідравліку, численні датчики та електронні блоки керування (ECU). Різноманіття та розподіленість цих компонентів зумовили необхідність уніфікації підходів до обміну даними між ними. До появи єдиного стандарту кожен виробник застосовував власні протоколи, що унеможливлювало «plug-and-play» підключення обладнання різних марок, ускладнювало діагностику та обмежувало можливості автоматизації.

Стандарт ISO 11783, відомий під назвою ISOBUS, був розроблений технічним комітетом ISO TC23/SC19 і вперше опублікований наприкінці 1990-х років. Він визначає послідовну мережу передачі даних для керування та зв'язку на сільськогосподарських тракторах і машинах. Основна мета стандарту — забезпечити відкриту, взаємопов'язану систему для бортових електронних систем, що використовуються в сільськогосподарському та лісовому обладнанні.

Стандарт ґрунтується на протоколі CAN (Controller Area Network), що був розроблений компанією Bosch для автомобільної промисловості, а також гармонізований із протоколом SAE J1939, який широко застосовується у важкому вантажному транспорті. Використання CAN як базової технології забезпечує надійність передачі даних в умовах високих вібрацій, значних температурних коливань та електромагнітних завад, що є критичним для роботи в польових умовах.

					14.17 - КР.014.1.000 ПЗ	Аркуш
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Структура та багаторівнева архітектура стандарту ISO 11783

Стандарт ISOBUS поділяється на 14 частин, які можна згрупувати за функціональними рівнями відповідно до моделі OSI (Open Systems Interconnection). Розуміння цієї архітектури є ключовим для правильної інтеграції мехатронних систем у кіберфізичний комплекс комбайна (таблиця 1.2).

Таблиця 1.2 – Структура стандарту ISO 11783 (ISOBUS)

Частина стандарту	Назва	Функціональне призначення
<i>Основа (Foundation)</i>		
ISO 11783-1	Загальна інформація та визначення	Термінологія, загальні принципи
ISO 11783-2	Фізичний рівень	Роз'єми, кабелі, електричні параметри
ISO 11783-3	Рівень каналу передачі даних	Формати повідомлень, BAM, RTS/CTS
ISO 11783-4	Мережевий рівень	Маршрутизація, міжмережеві з'єднання
ISO 11783-5	Керування мережею	Address claiming, конфігурація ECU
<i>Функціональні рівні (Functional)</i>		
ISO 11783-6	Віртуальний термінал	Графічний інтерфейс користувача, маски VT
ISO 11783-7	Рівень додатків контролера завдань (Basic)	Базові функції контролера завдань
ISO 11783-8	Контролер потужності	Керування ВВП (PTO)
ISO 11783-9	Tractor ECU	Сполучення між шиною трактора та знаряддя
ISO 11783-10	Контролер завдань (Повний)	XML-формат обміну даними з FMIS
ISO 11783-11	Словник мобільних даних	Параметри даних, DDI
ISO 11783-12	Діагностика	Коди несправностей, діагностичні повідомлення
ISO 11783-13	Файловий сервер	Логування даних, зберігання файлів
ISO 11783-14	Послідовний зв'язок з високою швидкістю	Розширення смуги пропускання (>250 kbit/s)

Найважливішими для розуміння мехатронної інтеграції є три функціональні блоки: Virtual Terminal (VT) — частина 6, Task Controller (TC) — частина 10 та Tractor Implement Management (TIM) — частина 9.

Роль ISOBUS у формуванні кіберфізичної системи (CPS) комбайна (рисунок 1.4).



Рисунок 1.4 – Мехатронна система комбайна за стандартом ISO 11783

Кіберфізична система (Cyber-Physical System, CPS) в агроінженерії — це складна система, у якій обчислювальні ресурси (кібер-компонент) тісно інтегровані з фізичними процесами (механічними, гідравлічними, термодинамічними) через мережу датчиків та виконавчих механізмів. Зернозбиральний комбайн є яскравим прикладом такої CPS: фізичні процеси обмолоту та сепарації керуються електронними контролерами на основі даних із сенсорів у реальному часі.

ISOBUS виконує роль універсальної комунікаційної шини, що з'єднує всі компоненти CPS комбайна, виконуючи функції:

1. Збір та передача даних. Датчики втрат зерна (п'єзоелектричні/оптичні) під'єднуються до шини ISOBUS як ECU-пристрої, передаючи потоки даних на центральний контролер. Для зернозбиральних комбайнів ISOBUS

використовується разом із системами позиціонування GNSS (GPS) для створення карт врожайності (yield mapping).

2. Розподілене керування. Контролери окремих вузлів (обмолот, очищення, двигун, гідравліка) об'єднуються в єдину мережу, що дає змогу реалізувати складні алгоритми автоматизації (на кшталт CEMOS AUTOMATIC від CLAAS, який самостійно оптимізує параметри, базуючись на даних із сенсорів втрат).

3. Взаємодія "Людина-Машина" (HMI). VT (Віртуальний термінал), визначений у частині 6 стандарту ISO 11783, забезпечує уніфікований графічний інтерфейс для оператора. Оператор комбайна використовує єдиний сенсорний дисплей для контролю всіх систем — від налаштувань молотарки до перегляду даних про втрати зерна в реальному часі. На відміну від застарілих рішень, де кожен агрегат вимагав окремого пульта, VT консолідує інформацію на одному екрані.

4. Хмарна телематика та цифрові двійники (Digital Twins). Завдяки ISOBUS дані з комбайна через телематичні шлюзи передаються в хмарні платформи (наприклад, CLAAS TELEMATICS, John Deere Operations Center). У наукових дослідженнях ISOBUS розглядається як ключовий технологічний елемент створення "цифрового двійника" комбайна та забезпечення кіберфізичного з'єднання між знаряддями та хмарними рішеннями.

Особливості інтеграції мехатронних систем збору врожаю

При модернізації зернозбирального комбайна системою автоматичного контролю втрат зерна інтеграція за стандартом ISOBUS має враховувати наступні технічні аспекти.

Адресація та протоколи транспортного рівня

ISOBUS використовує розподілену систему адресації на основі Address Claiming. Кожен новий ECU (наприклад, блок керування датчиком втрат зерна) під час увімкнення повинен здійснити процедуру зайняття адреси (Address Claim), щоб отримати унікальний 8-бітний ідентифікатор у мережі. Це

					14.17 - КР.014.1.000 ПЗ	Аркуш
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

забезпечує автоматичне конфігурування системи без потреби в ручному втручанні.

Для передачі великих обсягів даних (наприклад, файлів конфігурації або знімків із оптичних камер) застосовуються транспортні протоколи:

- BAM (Broadcast Announce Message) — широкомовна передача даних усім вузлам мережі.
- RTS/CTS (Request To Send / Clear To Send) — двоточкова передача великих пакетів даних між двома пристроями.

Ці протоколи забезпечують фрагментацію повідомлень розміром понад 8 байтів та їхню коректну збірку на приймальній стороні.

Віртуальний термінал (Virtual Terminal, VT)

Блоки керування системою контролю втрат зерна повинні бути сумісні зі специфікацією ISO 11783-6 для VT. Це означає, що інтерфейс користувача створюється не у вигляді окремого дисплея, а як набір графічних об'єктів (Object Pool), що відображаються на віртуальному терміналі трактора або комбайна. Для системи моніторингу втрат це передбачає створення VT-масок, які відображають:

- поточний рівень втрат (у % або кг/га) на дисплеї в кабіні;
- графічну індикацію розподілу втрат (наприклад, гістограма втрат за лівого/правого боку молотарки);
- індикатори граничних рівнів з можливістю налаштування порогів тривоги.

Контролер завдань (Task Controller, TC)

Частина 10 стандарту визначає контролер завдань, який керує виконанням польових робіт на основі попередньо завантажених завдань (ISO-XML файлів). У контексті системи контролю втрат зерна це дозволяє:

- автоматично змінювати налаштування комбайна залежно від зони поля (наприклад, збільшувати частоту обертання барабана на ділянках із густим стеблостоєм);

					14.17 - КР.014.1.000 ПЗ	Аркуш
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- логувати фактичні втрати зерна з прив'язкою до географічних координат для створення карт втрат;
- порівнювати планові показники з фактичними для оцінки ефективності роботи.

Керування знаряддям через трактор (TIM)

Розширення стандарту ISO 11783-9 впроваджує концепцію Tractor Implement Management (TIM), яка дозволяє знаряддю брати на себе часткове керування трактором (швидкістю, рульовим керуванням). Для комбайнової технології це означає потенційну можливість автоматичного зниження швидкості руху при досягненні критичного рівня втрат зерна, що не потребує втручання оператора.

Файловий сервер та логування даних (ISO 11783-13)

Відповідно до ISO 11783-13, система моніторингу втрат зерна повинна забезпечувати зберігання та обмін даними у форматі файлів. Для модернізованого комбайна це означає:

- наявність бортового файлового сервера для зберігання історії втрат;
- можливість вивантаження даних на USB-накопичувач або через телематичний модуль;
- сумісність форматів файлів для подальшого аналізу в офісному програмному забезпеченні.

Безпроводне розширення та перспективи розвитку ISOBUS

Сучасний стандарт ISOBUS базується на фізичному рівні CAN зі швидкістю 250 кбіт/с, що є недостатнім для передачі потокового відео з оптичних камер моніторингу втрат або великих файлів знімків високої роздільної здатності. Дослідження та розробки рухаються в напрямку ISOBUS Wireless Networking. Перспективні рішення для збільшення пропускної здатності включають:

- High Speed ISOBUS (ISO 11783-14) — специфікація, яка використовує фізичний рівень Ethernet для досягнення швидкостей передачі даних, значно вищих за 250 кбіт/с.

					14.17 - КР.014.1.000 ПЗ	Аркуш
						26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– OPC UA over ISO 11783 — комбінування нижніх рівнів OSI від ISO 11783 з верхніми рівнями від OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture), що відкриває шлях до промислової інтероперабельності на рівні підприємства.

– Злиття CAN та Ethernet — використання протоколу IEEE 1722 для "тунелювання" CAN-кадрів через Ethernet-мережі, що дозволяє гібридним системам поєднувати переваги обох технологій.

Сертифікація сумісності через AEF

Однією з ключових проблем, що ускладнювали масове впровадження стандарту на початкових етапах, була недостатня узгодженість реалізацій різними виробниками. Для вирішення цієї проблеми було створено Agricultural Industry Electronics Foundation (AEF) — незалежну некомерційну організацію, яка займається тестуванням та сертифікацією пристроїв на відповідність стандарту ISO 11783 та їхню сумісність між різними брендами.

Члени AEF проєктують та сертифікують свою продукцію відповідно до ISOBUS, що гарантує повну сумісність між тракторами, знаряддями, терміналами, датчиками та контрольними блоками різних виробників. Для модернізації зернозбирального комбайна системою контролю втрат зерна це означає: обране рішення (сенсори, контролер, VT-інтерфейс) повинно мати сертифікат AEF, що підтверджує його коректну роботу з комбайнами провідних марок (John Deere, CLAAS, New Holland, CASE IH).

Роль AgGateway ADAPT у забезпеченні сумісності даних

Окремим напрямом, що доповнює ISOBUS, є стандартизація обміну даними на рівні агрономічного програмного забезпечення. Організація AgGateway розробила платформу ADAPT (Agricultural Data Application Programming Toolkit) — відкриту утиліту для трансформації даних, яка вирішує проблему сумісності різних форматів даних у точному землеробстві.

ADAPT містить спеціальний ISO-плагін, який забезпечує коректне читання та запис ISO-XML файлів (формат, визначений у частині 10 стандарту), а також взаємодію з системами, що відповідають ISO 11783. Завдяки ADAPT

					14.17 - КР.014.1.000 ПЗ	Аркуш
						27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

дані з комбайна (карти врожайності, карти втрат, журнали подій) можуть бути проаналізовані в будь-якому агрономічному ПК без прив'язки до конкретного виробника.

Перспективи розвитку та виклики

Стандарт ISOBUS є динамічним і постійно вдосконалюється. Поточна версія (Версія 4 робочих наборів VT) впроваджує розширені функції графічного інтерфейсу та безпеки. Водночас залишаються невирішені проблеми:

- Пропускна здатність мережі. Класичний 250 кбіт/с CAN-інтерфейс може стати вузьким місцем при використанні високороздільних оптичних систем моніторингу. Перехід на High Speed ISOBUS (Ethernet) вимагатиме заміни фізичного рівня та адаптації всього стеку протоколів.

- Стандартизація мехатронних функцій. Хоча ISO 11783 визначає передачу даних, конкретні параметри (DDIs) для систем контролю втрат зерна не завжди уніфіковані між різними виробниками, що може спричиняти проблеми при інтеграції сторонніх рішень.

- Кібербезпека. Як зазначається в оглядовій літературі, стандарт ISO 11783 (на відміну від, наприклад, IEC 62443) не визначає жодної структури або вимог щодо кібербезпеки для агротехніки. Це питання стає особливо критичним при переході до безпроводних рішень та хмарних сервісів диспетчеризації парку машин.

					14.17 - КР.014.1.000 ПЗ	Аркуш
						28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

На основі проведеного аналітичного огляду сучасного стану питання щодо модернізації зернозбиральних комбайнів системами автоматичного контролю втрат зерна можна зробити наступні узагальнюючі висновки.

1. Технологічні процеси обмолоту та сепарації є основними джерелами втрат зерна. Встановлено, що сумарні технологічні втрати за комбайнового збирання можуть сягати 16–18% від валового збору, причому найбільша частка (до 20–30% від загальних втрат) припадає саме на недомолот і недосконалу сепарацію вільного зерна в соломотрясі. Взаємозв'язок між режимами обмолоту (частота обертання барабана, величина зазору) та ефективністю сепарації є нелінійним, що унеможлиблює досягнення мінімуму втрат без застосування системи автоматичного моніторингу та керування в реальному часі.

2. Сучасні системи автоматичного моніторингу втрат зерна базуються на трьох основних типах сенсорів, кожен із яких має власну область ефективного застосування та суттєві обмеження. П'єзоелектричні датчики залишаються найпоширенішим компромісом між вартістю, надійністю та точністю (похибка 3–8%), однак вони не здатні виявляти зерно, захоплене соломою, та генерують «фантомні» показання від ударів незернових частинок. Акустичні датчики забезпечують частотне розділення зерна (15 кГц) та стебел (7 кГц) з похибкою близько 6,1%, але мають критичну чутливість до шуму навколишнього середовища та погодних умов. Оптичні системи комп'ютерного зору (Yield EyeQ, Farmwave) є найбільш перспективним напрямом завдяки прямому підрахунку втрачених зерен та здатності до абсолютної кількісної оцінки, однак їхнє масове впровадження стримується високою вартістю (€9 000–12 000) та чутливістю до запилення.

3. Для підвищення точності моніторингу та усунення систематичних похибок необхідне поєднання оперативних сенсорів з еталонними методами калібрування. Найефективнішим референсним методом є використання падаючих піддонів (drop pans), таких як Bushel Plus SmartPan, які забезпечують

					14.17 - КР.014.1.000 ПЗ	Аркуш
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

абсолютне вимірювання втрат у кг/га та інтегруються з автоматизованими системами налаштування комбайна (John Deere Harvest Settings Automation). Це дає змогу періодично коригувати дрейф калібрування п'єзоелектричних датчиків і валідувати результати оптичних систем.

4. Стандарт ISO 11783 (ISOBUS) є необхідною технологічною основою для інтеграції системи контролю втрат зерна в кіберфізичний комплекс комбайна. Використання ISOBUS забезпечує уніфіковане підключення сенсорів через CAN-мережу, автоматичну адресацію ECU (Address Claiming), візуалізацію даних на штатному віртуальному терміналі (VT) відповідно до ISO 11783-6, а також логування втрат із географічною прив'язкою через контролер завдань (Task Controller, ISO 11783-10). Сертифікація пристроїв AEF гарантує сумісність із комбайнами провідних виробників, а використання AgGateway ADAPT забезпечує обмін даними з агрономічними інформаційними системами (FMIS).

5. Обмеження класичного ISOBUS (швидкість 250 кбіт/с на фізичному рівні CAN) стає критичним при використанні високороздільних оптичних систем моніторингу втрат. Перспективним рішенням є перехід на High Speed ISOBUS (ISO 11783-14) на базі Ethernet, а також гібридні архітектури з «тунелюванням» CAN-кадрів через Ethernet (IEEE 1722). Водночас відсутність у стандарті вимог до кібербезпеки (на відміну від IEC 62443) створює потенційні вразливості при підключенні сторонніх пристроїв або використанні телематичних каналів зв'язку.

6. Сучасні автоматизовані системи керування комбайнами (CLAAS CEMOS AUTOMATIC, John Deere Harvest Settings Automation, New Holland IntelliSense) демонструють можливість зменшення втрат зерна на 15–33% та підвищення продуктивності на 7–25% завдяки інтеграції датчиків втрат з алгоритмами автоматичної оптимізації режимів обмолоту, сепарації та очищення. Це підтверджує доцільність модернізації існуючих комбайнів, які не оснащені такими системами, шляхом додавання сенсорного блоку та контролера з підтримкою ISOBUS.

					14.17 - КР.014.1.000 ПЗ	Аркуш
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ ВТРАТ ЗЕРНА

2.1 Математичне моделювання динамічної взаємодії зернівки з чутливим елементом п'єзоелектричного датчика

Мета та завдання математичного моделювання

Для створення ефективної системи автоматичного контролю втрат зерна необхідно глибоко розуміти фізичні процеси, що відбуваються при ударі зернівки об чутливий елемент п'єзоелектричного датчика. Математичне моделювання динамічної взаємодії дозволяє:

1. Визначити кількісний зв'язок між механічними параметрами удару (маса зернівки, її швидкість, кут зіткнення) та електричним сигналом на виході п'єзоелектричного перетворювача.
2. Обґрунтувати вибір геометричних параметрів чутливої пластини (матеріал, товщина, форма, спосіб закріплення) для забезпечення максимальної чутливості та мінімальної похибки.
3. Розробити алгоритми обробки сигналу, що дають змогу відрізнити удар зерна від удару легких домішок (полови, пилу, уламків соломи) на основі аналізу форми та спектральних характеристик імпульсу.
4. Оцінити вплив вібрацій комбайна та інших завад на точність вимірювань та обґрунтувати методи їх компенсації.

					14.17 - КР.014.2.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Бабак				РОЗДІЛ 2		Літ.	Аркуш
Перевір.	Дядюра К. О.							Аркушів
Реценз.							31	20
Н. Контр.								
Затверд.	Дядюра К. О.							

Фізична постановка задачі

Розглянемо класичну конструкцію п'єзоелектричного датчика втрат зерна, що встановлюється в потоці вороху після системи очищення (на викиді полови) або під клавішним соломотрясом. Чутливий елемент являє собою тонку металеву пластину (зазвичай з алюмінієвого сплаву або нержавіючої сталі), на якій закріплений п'єзоелектричний перетворювач (PZT або PVDF). При ударі зернівки об пластину виникає механічна напруга, яка через п'єзоефект перетворюється на електричний заряд, пропорційний прикладеній силі (рисунок 2.1).

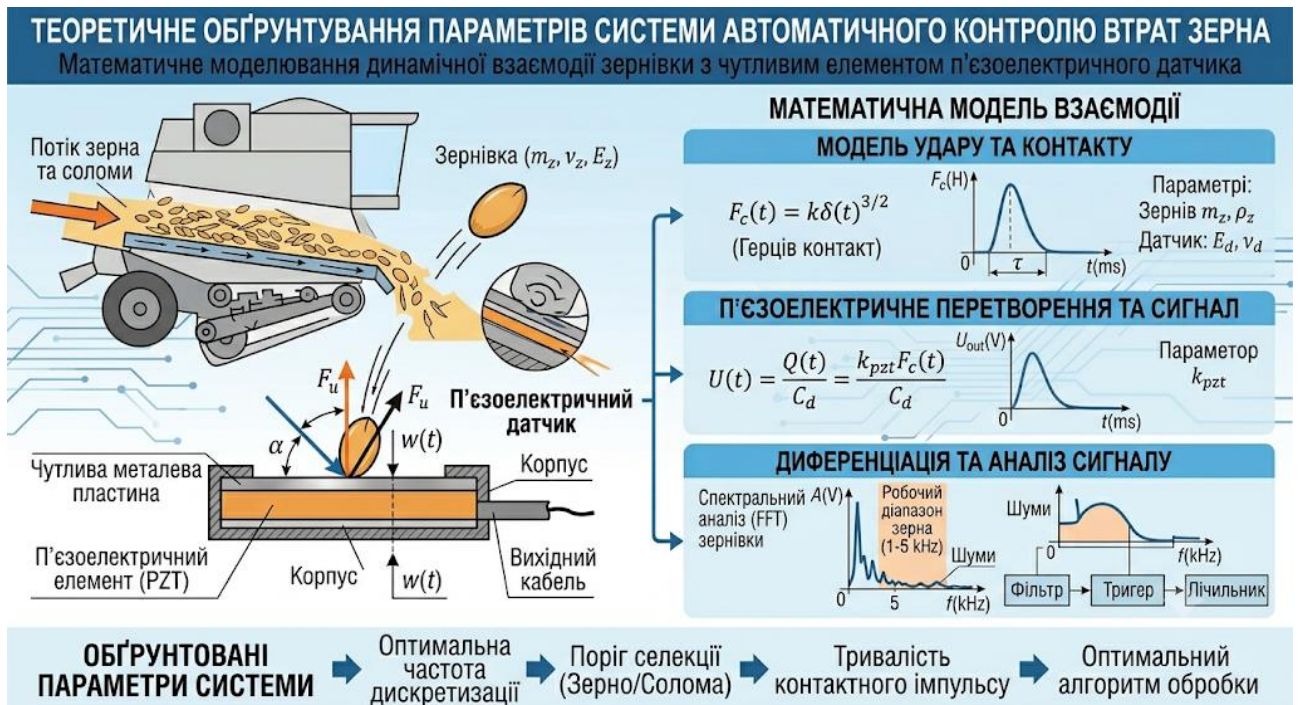


Рисунок 2.1 – Математичне моделювання динамічної взаємодії зернівки з чутливим елементом п'єзоелектричного датчика

Основні фізичні припущення моделі:

1. Зернівка моделюється як абсолютно тверде тіло сферичної форми з відомою масою m_g та радіусом R_g . Для пшениці середня маса зернівки становить 35 ... 45 мг, для рису — 20 ... 30 мг, для кукурудзи — 250 ... 350 мг.

2. Чутлива пластина розглядається як пружна тонка пластина (thin plate) з відомими геометричними розмірами (довжина L , ширина W , товщина h) та механічними характеристиками (модуль Юнга E , коефіцієнт Пуассона ν , густина ρ).

3. Удар вважається центральним або близьким до центрального (для спрощення моделі). Кут зіткнення θ між вектором швидкості зернівки та нормаллю до поверхні пластини враховується через проєкцію імпульсу.

4. Пластина кріпиться на жорсткій основі через віброізолюючі елементи, однак для моделі динаміки удару в першому наближенні вважаємо, що механічний імпеданс основи значно вищий за імпеданс пластини, тому краї пластини є жорстко закріпленими (защемлення).

5. Деформації пластини під час удару є малими порівняно з її товщиною, що дозволяє використовувати лінійну теорію пружності. Пластина працює в режимі згинальних коливань.

6. П'єзoeлектричний перетворювач розташований в зоні максимальних деформацій (зазвичай в центрі пластини або поблизу краю залежно від способу кріплення).

Модель удару твердої частинки об пружну пластину

Кінематика удару

Нехай зернівка масою m_g рухається зі швидкістю v_0 (відносна швидкість потоку вороху відносно пластини). Проекція швидкості на нормаль до пластини: $v_n = v_0 \cos \theta$. Тангенціальна складова $v_t = v_0 \sin \theta$ в першому наближенні не впливає на нормальну силу удару (тертя вважаємо несуттєвим через короткочасність контакту).

При ударі виникає контактна сила $F_c(t)$, яка діє на пластину протягом часу контакту τ_c . Згідно з теорією Герца для пружного зіткнення сфери з плоскою поверхнею, залежність сили від зближення $\alpha(t)$ (відносного переміщення центру зернівки та точки контакту в напрямку нормалі) має вигляд:

$$F_c(t) = k_H \cdot \alpha(t)^{3/2}, \quad (2.1)$$

					14.17 - КР.014.2.000 ПЗ	Аркуш
						33
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де k_H — коефіцієнт Герца, що визначається механічними властивостями матеріалів:

$$k_H = \frac{4}{3} \cdot \frac{\sqrt{R_g}}{(1-\nu_g^2)/E_g + (1-\nu_p^2)/E_p}, \quad (2.2)$$

де E_g, ν_g — модуль Юнга та коефіцієнт Пуассона матеріалу зернівки (для крохмалистої речовини ефективні значення $E_g \approx 10 \dots 30$ МПа, $\nu_g \approx 0.3 \dots 0.4$), E_p, ν_p — відповідні характеристики матеріалу пластини (алюміній: $E_p \approx 70$ ГПа, $\nu_p \approx 0.33$).

Максимальна контактна сила досягається при максимальному зближенні $\alpha_{\max}$:

$$F_{\max} = k_H \alpha_{\max}. \quad (2.3)$$

Закон руху зернівки під дією контактної сили (зворотний бік — інерційний опір):

$$m_g \ddot{\alpha}(t) = -F_c(t) = -k_H \alpha(t)^{3/2}. \quad (2.4)$$

Це нелінійне диференціальне рівняння має аналітичний розв'язок для тривалості контакту:

$$\tau_c = 2 \cdot \sqrt{\frac{m_g \alpha_{\max}}{k_H}} \cdot \int_0^1 \frac{d\xi}{\sqrt{1-\xi^{5/2}}} \approx 2.94 \cdot \sqrt{\frac{m_g \alpha_{\max}}{k_H}}. \quad (2.5)$$

З використанням закону збереження енергії (початкова кінетична енергія переходить у потенційну енергію пружної деформації):

$$\frac{m_g v_n^2}{2} = \int_0^{\alpha_{\max}} k_H \alpha^{3/2} d\alpha = \frac{2}{5} k_H \alpha_{\max}, \quad (2.6)$$

звідки

$$\alpha_{\max} = \left(\frac{5m_g v_n^2}{4k_H} \right)^{2/5}, F_{\max} = k_H \alpha_{\max} = k_H \left(\frac{5m_g v_n^2}{4k_H} \right)^{3/5}. \quad (2.7)$$

Таким чином, максимальна контактна сила пропорційна $v_n^{6/5}$ та $m_g^{3/5}$.

Чисельний приклад для пшениці:

$m_g = 40$ мг = $4 \cdot 10^{-5}$ кг, $R_g = 1.5$ мм = $1.5 \cdot 10^{-3}$ м, $v_n = 10$ м/с (типова швидкість потоку в комбайні). Прийmemo $E_g = 20$ МПа = $2 \cdot 10^7$ Па, $E_p =$

$70 \text{ ГПа} = 7 \cdot 10^{10} \text{ Па}$, $\nu_g = 0.35$, $\nu_p = 0.33$. Тоді $k_H \approx 1.2 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^{3/2}$.

Розрахунок дає $\alpha_{\max} \approx 0.024 \text{ мм}$, $F_{\max} \approx 1.1 \text{ Н}$, $\tau_c \approx 30 \text{ мкс}$.

Часова залежність контактної сили

Для інженерних розрахунків корисна апроксимація форми імпульсу сили у вигляді напівхвилі синусоїди:

$$F_c(t) = F_{\max} \cdot \sin\left(\frac{\pi t}{\tau_c}\right), 0 \leq t \leq \tau_c. \quad (2.8)$$

Така апроксимація дає задовільну точність для більшості практичних завдань. Імпульс сили (переданий механічний імпульс) становить:

$$I = \int_0^{\tau_c} F_c(t) dt = \frac{2\tau_c F_{\max}}{\pi}. \quad (2.9)$$

З іншого боку, зміна імпульсу зернівки: $I = m_g v_n (1 + e)$, де e — коефіцієнт відновлення (для пружного удару $e \approx 0.5 \dots 0.8$ для зерна по металу). Узгодження обох виразів дає додаткове співвідношення для перевірки моделі.

Динаміка згинальних коливань чутливої пластини

Під дією контактної сили $F_c(t)$, прикладеної в точці з координатами (x_0, y_0) , в пластині виникає поле переміщень $w(x, y, t)$, яке описується рівнянням згинальних коливань тонкої пластини (рівняння Софі Жермен — Лагранжа — Кірхгофа):

$$D \nabla^4 w + \rho_p h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = F_c(t) \delta(x - x_0) \delta(y - y_0), \quad (2.10)$$

де: $D = \frac{E_p h^3}{12(1-\nu_p^2)}$ — згинальна жорсткість пластини;

$\nabla^4 = \left(\frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4} \right)$ — бігармонічний оператор; ρ_p — густина матеріалу пластини; h — товщина пластини; $\delta(\cdot)$ — дельта-функція Дірака.

Граничні умови залежать від способу кріплення пластини. Найпоширеніші варіанти:

- жорстке защемлення по контуру: $w = 0$ та $\frac{\partial w}{\partial n} = 0$ на всіх краях.
- вільне опертя (шарнірне кріплення): $w = 0$ та $M_n = 0$ (згинальний момент на краю дорівнює нулю).

					14.17 - КР.014.2.000 ПЗ	Аркуш
						35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– комбіноване кріплення (наприклад, защемлення на двох протилежних краях, вільні краї на інших).

Для забезпечення високої чутливості та відтворюваності сигналу найчастіше використовують пластину з жорстким защемленням по всьому периметру (чотиристороннє закріплення), що дає високі власні частоти та добротність.

Розв'язок методом розкладання за власними формами коливань

Розв'язок рівняння коливань шукаємо у вигляді розкладу за власними формами $\phi_{mn}(x, y)$ (ортонормованими):

$$w(x, y, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} q_{mn}(t) \cdot \phi_{mn}(x, y), \quad (2.11)$$

де $q_{mn}(t)$ — узагальнені координати (модальні амплітуди), що задовольняють рівняння осцилятора:

$$\ddot{q}_{mn} + 2\zeta_{mn}\omega_{mn}\dot{q}_{mn} + \omega_{mn}^2 q_{mn} = \frac{1}{\mu_{mn}} F_c(t) \phi_{mn}(x_0, y_0). \quad (2.12)$$

Тут:

- ω_{mn} — власні частоти коливань пластини;
- ζ_{mn} — коефіцієнти демпфування (зазвичай $\zeta_{mn} \approx 0.01 \dots 0.05$ для металевих пластин у повітрі);
- $\mu_{mn} = \int_S \rho_p h \phi_{mn}^2 dS$ — модальна маса.

Власні частоти для прямокутної пластини з жорстким защемленням наближено визначаються виразом:

$$\omega_{mn} = \lambda_{mn}^2 \sqrt{\frac{D}{\rho_p h}} \cdot \frac{1}{L^2}, \quad (2.13)$$

де λ_{mn} — коефіцієнти, що залежать від співвідношення сторін L/W . Для квадратної пластини ($L = W$): $\lambda_{11} \approx 35.99$, $\lambda_{12} = \lambda_{21} \approx 73.41$, $\lambda_{22} \approx 108.27$ та ін.

					14.17 - КР.014.2.000 ПЗ	Аркуш
						36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Деформації та напруження в пластині

Для п'єзоелектричного перетворювача важливими є компоненти тензора деформацій в точці розташування п'єзоелемента. При згині пластини найбільші деформації виникають у поверхневих шарах (на відстані $\pm h/2$ від нейтральної площини). Лінійні деформації вздовж осей x та y :

$$\varepsilon_{xx}(x, y, t) = -\frac{h}{2} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \varepsilon_{yy}(x, y, t) = -\frac{h}{2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}, \varepsilon_{xy}(x, y, t) = -h \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}. \quad (2.14)$$

Відповідні напруження за законом Гука для плоского напруженого стану:

$$\sigma_{xx} = \frac{E_p}{1 - \nu_p^2} (\varepsilon_{xx} + \nu_p \varepsilon_{yy}), \sigma_{yy} = \frac{E_p}{1 - \nu_p^2} (\varepsilon_{yy} + \nu_p \varepsilon_{xx}), \tau_{xy} = \frac{E_p}{2(1 + \nu_p)} \varepsilon_{xy}.$$

П'єзоелектричний перетворювач: модель генерації електричного сигналу

П'єзоелектричний ефект описується рівняннями прямої та зворотної дії. У прямому п'єзоєфекті (режим сенсора) електричне зміщення D_i (вектор електричної індукції) пов'язане з механічними напруженнями σ_{jk} через п'єзомодулі d_{ijk} :

$$D_i = d_{ijk} \sigma_{jk} + \varepsilon_{ij}^{\sigma} E_j, \quad (2.15)$$

де $\varepsilon_{ij}^{\sigma}$ — діелектрична проникність при сталому механічному напруженні, E_j — напруженість електричного поля. Для типових п'єзокерамік (PZT) використовують скорочену матричну форму. Для пластини, навантаженої згином, основний внесок дають компоненти d_{31} та d_{32} :

$$D_3 = d_{31} \sigma_{11} + d_{32} \sigma_{22} + \varepsilon_{33}^{\sigma} E_3. \quad (2.16)$$

При розімкненому ланцюзі ($D_3 = 0$) напруга холостого ходу на електродах:

$$V_{oc}(t) = \frac{1}{C_p} \int_S (d_{31} \sigma_{xx}(x, y, t) + d_{32} \sigma_{yy}(x, y, t)) dA, \quad (2.17)$$

де C_p — ємність п'єзоелемента, інтегрування ведеться по площі електродів. Якщо п'єзоелемент малий порівняно з розмірами пластини, напруга приблизно пропорційна середньому напруженню в зоні його розташування:

$$V_{oc}(t) \approx K_p \cdot \sigma_{xx}(x_p, y_p, t), \quad (2.18)$$

					14.17 - КР.014.2.000 ПЗ	Аркуш
						37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де K_p — чутливість перетворювача (В/Па), що визначається п'єзомодулем, геометрією та ємністю.

Для PVDF плівки справедлива аналогічна модель, однак п'єзомодулі PVDF значно менші ($d_{31} \approx 20 \dots 30$ пКл/Н проти $d_{31} \approx 200 \dots 400$ пКл/Н для PZT), але гнучкість плівки дозволяє краще конформувати до поверхні пластини.

Імпульсна характеристика системи «пластина + п'єзоелемент»

З урахуванням лінійності системи для малих деформацій, вихідний сигнал датчика є згорткою контактної сили з імпульсною характеристикою пластини $h_{pl}(t)$ та електричною характеристикою п'єзоелемента $h_{pz}(t)$:

$$V_{out}(t) = (F_c * h_{pl} * h_{pz})(t) = \int_0^t F_c(\tau) \cdot H(t - \tau) d\tau,$$

де $H(t)$ — загальна імпульсна характеристика датчика. У частотній області:

$$V_{out}(\omega) = F_c(\omega) \cdot H_{pl}(\omega) \cdot H_{pz}(\omega). \quad (2.19)$$

Оцінка амплітуди вихідного сигналу

Для інженерної оцінки порядку величини вихідної напруги можна скористатися спрощеною моделлю: пластина розглядається як пружина з еквівалентною жорсткістю k_{eq} у точці удару. Тоді максимальне переміщення пластини в точці удару $w_{max} \approx F_{max}/k_{eq}$. Для квадратної пластини з жорстким защемленням еквівалентна жорсткість у центрі:

$$k_{eq} = 4\pi^2 \cdot \frac{D}{L^2} \cdot C, \quad (2.20)$$

де $C \approx 0.14$ для квадратної пластини. Типові значення: $L = 50$ мм, $h = 1$ мм, алюміній — $k_{eq} \approx 5 \dots 10$ кН/м. При $F_{max} = 1$ Н, $w_{max} \approx 0.1 \dots 0.2$ мм. Напруження в місці кріплення п'єзоелемента пропорційне кривизні пластини. Для центрально навантаженої пластини максимальні напруження виникають по краях, однак п'єзоелемент часто розташовують поблизу краю для збільшення чутливості. Типові значення напруг: $\sigma_{max} \approx 0.5 \dots 5$ МПа. Для PZT з $d_{31} = 200$ пКл/Н та товщиною п'єзоелемента $h_p = 0.2$ мм, напруга холостого

					14.17 - КР.014.2.000 ПЗ	Аркуш
						38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ходу: $V_{oc} \approx \sigma \cdot d_{31} / \varepsilon_{33} \cdot h_p$. При $\sigma = 1$ МПа отримуємо $V_{oc} \approx 0.5 \dots 2$ В, що є достатнім для подальшого підсилення.

Вплив форми пластини та способу кріплення на чутливість

Теоретичний аналіз з використанням варіаційних методів показує, що форма чутливої пластини суттєво впливає на чутливість датчика та його здатність розрізняти удари зерна та домішок.

Прямокутна пластина (традиційна форма) має неоднорідну чутливість по площі: ближче до центрів країв чутливість вища, в кутах – нижча. Це призводить до похибок, пов'язаних із тим, що зерно може потрапити в зони з різною чутливістю.

Кругла пластина з центральним заземленням або опертям по контуру забезпечує більш рівномірний розподіл деформацій і, як наслідок, менший розкид сигналу для ударів у різних точках. У сучасних дослідженнях (Sensors, 2025) запропоновано круглу нержавіючу пластину товщиною 0.5 мм, що дає на 30% вищу чутливість порівняно з прямокутною завдяки кращій передачі вібраційної енергії.

Овальна або еліптична пластина може бути компромісом для встановлення в обмеженому просторі комбайна.

Оптимальна товщина пластини визначається з умови, що власна частота пластини має бути значно вищою за характерні частоти спектру контактної сили (щоб не спотворювати форму імпульсу) і водночас забезпечувати достатню механічну міцність. Рекомендований діапазон: $h = 0.5 \dots 1.0$ мм для алюмінію, $h = 0.3 \dots 0.6$ мм для нержавіючої сталі.

Моделювання розрізнення зерна та домішок за спектральними характеристиками

Удари легких домішок (полови, пилу) мають значно меншу кінетичну енергію та більшу тривалість контакту через їхню деформівність і малу масу. Для полови типові параметри: маса $m_c \approx 1 \dots 5$ мг, швидкість $v_c \approx 5 \dots 8$ м/с. Контактна сила для полови може бути в 10–50 разів меншою, ніж для зерна.

					14.17 - КР.014.2.000 ПЗ	Аркуш
						39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Однак більш надійне розрізнення досягається в частотній області. Спектр сигналу від удару зерна має характерний пік у діапазоні $f \approx 1 \dots 10$ кГц залежно від розмірів пластини. Проведені дослідження (Agromotu, 2024) показали, що для зерна пшениці основна спектральна потужність зосереджена в смузі 1.5 ... 3.5 кГц, тоді як для стебел і полови – нижче 1 кГц. Для датчика з круглою пластиною розроблено смуговий фільтр з пропусканням 1.0 ... 3.0 кГц та порогом напруги 3.5 В, що забезпечує точність виявлення понад 90%.

Таким чином, математична модель дозволяє синтезувати адаптивний цифровий фільтр, параметри якого налаштовуються під конкретну культуру та конструкцію датчика.

Врахування вібраційних завад від комбайна

Комбайн є джерелом потужних вібрацій у широкому діапазоні частот (від десятків Гц до кількох кГц). Основними джерелами є робота двигуна (частота обертання колінчастого вала 20...30 Гц), обертання молотильного барабана (5...10 Гц), робота клавішного соломотряса (4...6 Гц), вентилятора очищення (15...25 Гц). Ці вібрації передаються на корпус датчика та можуть спричинити помилкові спрацьовування.

Для зменшення впливу вібрацій застосовують:

1. *Віброізоляцію датчика* – встановлення пластини на гумових або пружинних амортизаторах із власною частотою значно нижчою за частоту збуджуючих вібрацій (наприклад, 5...10 Гц). Це послаблює передачу вібрацій корпусу на чутливу пластину.

2. *Диференціальну схему включення* – використання двох п'єзoeлементів, один з яких навантажений ударом зерна, а другий є компенсаційним (екранованим від ударів). Сигнали віднімаються, що дозволяє виділити корисну складову.

3. *Адаптивну фільтрацію* – на основі оцінки спектра вібрацій в реальному часі та віднімання його з загального сигналу за допомогою алгоритмів типу LMS (Least Mean Squares).

					14.17 - КР.014.2.000 ПЗ	Аркуш
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Математична модель вібраційної завади $V_{vib}(t)$ може бути подана як лінійна комбінація гармонічних складових з випадковими амплітудами та фазами. Тоді загальний сигнал датчика:

$$V_{total}(t) = V_{grain}(t) + V_{vib}(t) + n(t), \quad (2.21)$$

де $n(t)$ – тепловий шум. Завдання фільтрації – мінімізувати похибку оцінки $V_{grain}(t)$.

Програмна реалізація математичної моделі

Для чисельного моделювання динаміки датчика доцільно використовувати комбінований підхід:

- Метод скінченних елементів (FEM) у пакетах ANSYS, COMSOL або FreeFEM для розрахунку власних частот, форм коливань та частотної характеристики пластини з урахуванням реальної геометрії та граничних умов.
- Моделювання удару за допомогою дискретного методу елементів (DEM) для визначення розподілу контактних сил залежно від кута, швидкості та форми зернівки.

Розроблена математична модель дозволяє виконати параметричну оптимізацію датчика (вибір L, W, h, E_p, ρ_p та способу кріплення) за критерієм максимуму відношення сигнал/шум для заданого діапазону мас зерна та швидкостей потоку.

2.2 Енергетичний та інформаційний баланси: взаємодія технічних систем (молотильного апарату, сепаратора соломотряса та електронного контролера)

Концепція системної єдності технічних підсистем комбайна

Сучасний зернозбиральний комбайн є складною технічною системою, у якій тісно взаємодіють механічні, гідравлічні, пневматичні та електронні підсистеми. Для ефективного автоматичного контролю втрат зерна необхідно розглядати не окремі вузли (молотильний апарат, соломотряс, очищення), а їхню енергетичну та інформаційну єдність. Під енергетичним балансом

14.17 - КР.014.2.000 ПЗ					Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	41

розуміють розподіл потужності, що підводиться до комбайна від двигуна, між окремими технологічними процесами. Під інформаційним балансом — потоки даних від сенсорів до контролера та керуючих сигналів від контролера до виконавчих механізмів.

Метою цього підрозділу є встановлення кількісних співвідношень між режимними параметрами роботи молотильного апарату та соломотряса, з одного боку, та сигналом системи контролю втрат — з іншого, а також обґрунтування принципів узгодження цих підсистем у єдиному кіберфізичному комплексі.

Енергетичний баланс молотильного апарату (рисунок 2.2).

Молотильний апарат (барабан + підбарабання) є одним із найбільш енергоємних вузлів комбайна. Потужність, що споживається молотаркою P_{th} , витрачається на:

ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ТА ІНФОРМАЦІЙНИЙ БАЛАНСИ: ВЗАЄМОДІЯ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

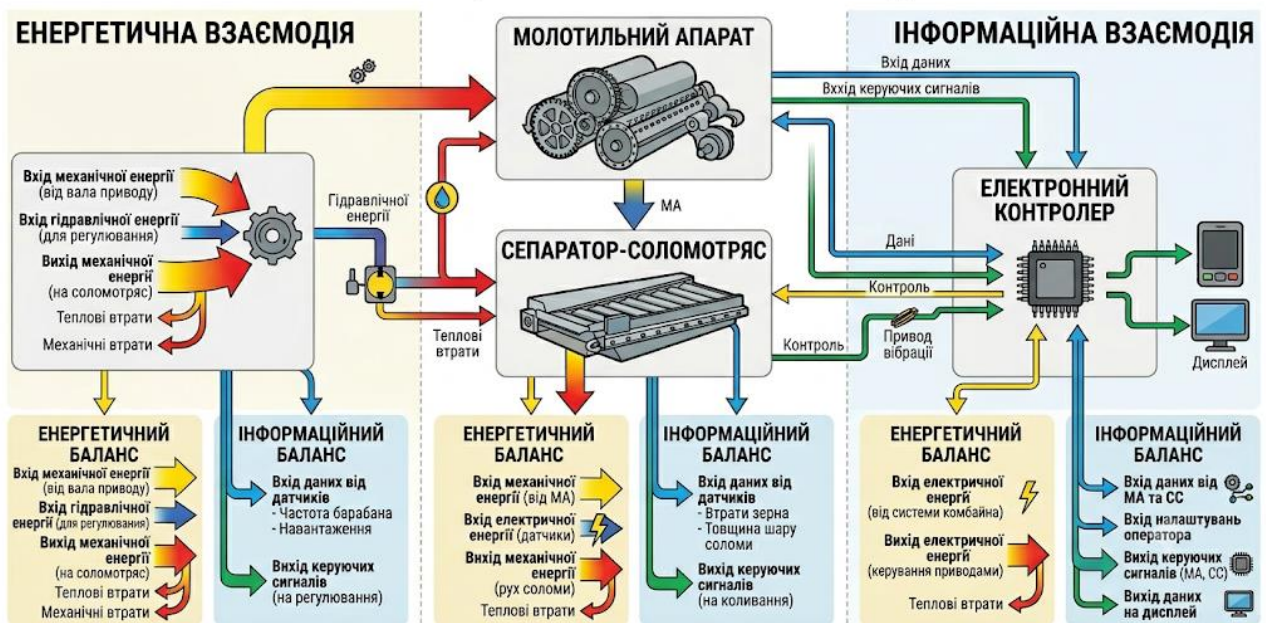


Рисунок 2.2 – Енергетичний та інформаційний баланси

- Обмолот – руйнування зв’язків зерна з колосом та подрібнення соломистої маси.
- Розгін хлібної маси до окружної швидкості барабана.
- Подолання тертя в підшипниках та повітряного опору.

Спрощена модель енергетичного балансу має вигляд:

$$P_{th} = P_{idle} + P_{feed} + P_{thr}, \quad (2.22)$$

де P_{idle} — потужність холостого ходу (на обертання барабана без подачі маси); P_{feed} — потужність на розгін маси; P_{thr} — потужність безпосередньо на обмолот.

Потужність на розгін маси визначається подачею q [кг/с] та окружною швидкістю барабана $v_b = \omega_b R_b$:

$$P_{feed} = \frac{qv_b^2}{2} \cdot \eta_{feed}, \quad (2.23)$$

де $\eta_{feed} \approx 0.6 \dots 0.8$ — коефіцієнт, що враховує нерівномірність розгону.

Потужність на обмолот P_{thr} залежить від типу культури, вологості, зазору Δ та інтенсивності вимолочування. Емпіричні дослідження дають залежність:

$$P_{thr} = k_{th} \cdot q \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot L_{th}}) \cdot \frac{1}{\Delta}, \quad (2.24)$$

де k_{th} — питома енергоємність обмолоту (для пшениці $k_{th} \approx 1.2 \dots 2.5$ кДж/кг); λ — коефіцієнт інтенсивності вимолочування; L_{th} — довжина молотильної зони.

Втрати за обмолотом L_{thres} (частка недомолочених колосків) експоненціально залежать від енергії, що витрачається на обмолот:

$$L_{thres} = L_{thres0} \cdot \exp \left(-\frac{P_{thr}}{P_0} \right), \quad (2.25)$$

де L_{thres0} — втрати за відсутності обмолоту (приблизно 100%), P_0 — характерна потужність, що визначає чутливість. Збільшення P_{thr} зменшує недомолот, але зростає пошкодження зерна та енергоспоживання.

Енергетичний баланс соломотряса (сепаратора)

Клавішний соломотряс призначений для виділення вільного зерна з соломистого вороху. Енергія на привід соломотряса P_{sep} витрачається на переміщення шару вороху, подолання тертя між шарами та вібрацію клавіш.

					14.17 - КР.014.2.000 ПЗ	Аркуш
						43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Питома енергоємність сепарації e_{sep} [Дж/кг] залежить від товщини шару H_s та частоти коливань f_{sep} :

$$P_{sep} = e_{sep}(H_s, f_{sep}) \cdot q_{sep}, \quad (2.26)$$

де q_{sep} — масова витрата вороху, що надходить на соломотряс (зазвичай $q_{sep} = q - q_{thr_sep}$, де q_{thr_sep} — зерно, відсепароване в підбарабанні).

Коефіцієнт сепарації η_{sep} (частка вільного зерна, виділеного соломотрясом) описується експоненціальною залежністю від довжини шляху x на соломотрясі:

$$\eta_{sep}(x) = 1 - e^{-k_{sep}x}, \quad (2.27)$$

де k_{sep} — коефіцієнт інтенсивності сепарації, що залежить від вібраційних параметрів та властивостей маси. Енергія, що витрачається на сепарацію, повинна забезпечити достатню інтенсивність коливань для розпушування шару та «прочісування» вороху. Зв'язок між k_{sep} та питомою енергією:

$$k_{sep} = \alpha_{sep} \sqrt{\frac{P_{sep}}{m_{sep}}}, \quad (2.28)$$

де m_{sep} — маса вороху на соломотрясі, α_{sep} — коефіцієнт пропорційності.

Втрати за сепарацією L_{sep} — це зерно, що залишилося в соломі після виходу з соломотряса:

$$L_{sep} = q_{free} \cdot e^{-k_{sep}L_{sep_eff}}, \quad (2.29)$$

де q_{free} — кількість вільного зерна на вході в соломотряс, L_{sep_eff} — ефективна довжина сепарації.

Інформаційний баланс: потоки даних та керування

Інформаційна система автоматичного контролю втрат зерна включає такі основні елементи (рисунки 2.3):

1. Датчики втрат (п'єзоелектричні, акустичні, оптичні), які генерують сигнал $S_{loss}(t)$, пропорційний миттєвій інтенсивності втрат.

2. Блок попередньої обробки (підсилювач, фільтр, АЦП), який перетворює аналоговий сигнал у цифровий потік даних.

					14.17 - КР.014.2.000 ПЗ	Аркуш
						44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. *Мікроконтролер (ECU)* — центральний процесор, що реалізує алгоритми фільтрації, розпізнавання, обчислення поточних втрат $L_{curr}(t)$ та прийняття рішень.

4. *CAN-шина ISOBUS* — передає дані на віртуальний термінал (дисплей оператора) та отримує команди від оператора або автоматичної системи.

5. *Виконавчі механізми* — приводи регулювання частоти обертання барабана (ω_b), молотильного зазору (Δ), частоти обертання вентилятора очищення (ω_{fan}), положення решіт, а також гідростатична трансмісія для зміни поступальної швидкості v_f .



Рисунок 2.3 – Інформаційна система автоматичного контролю втрат зерна

Інформаційний баланс визначається співвідношенням між швидкістю надходження даних R_{data} та обчислювальною потужністю контролера C_{CPU} . Для системи реального часу необхідно виконання нерівності:

$$R_{data} \leq C_{CPU} \cdot \eta_{CPU}, \quad (2.30)$$

де $\eta_{CPU} < 1$ — коефіцієнт запасу (рекомендовано $\eta_{CPU} \leq 0.7$). При типовій частоті дискретизації датчиків $f_s = 10 \dots 20$ кГц та розрядності АЦП 12 біт, потік даних від одного датчика становить 120 ... 240 кбіт/с. Це цілком

узгоджується з пропускнуою здатністю CAN 250 кбіт/с, однак при використанні кількох датчиків (наприклад, лівий/правий канали) або оптичних камер виникає необхідність у стисненні даних або переході на High Speed ISOBUS.

Взаємодія підсистем: передавальні функції

Для аналізу динаміки системи «молотарка – соломотряс – контролер» введемо передавальні функції, що пов'язують вхідні впливи (зміна подачі q , регулювальні параметри) з вихідними сигналами (втрати L_{total}) та керуючими сигналами.

Передавальна функція молотильного апарату:

$$G_{th}(s) = \frac{L_{thres}(s)}{\Delta\omega_b(s)} = \frac{K_{th}}{1+\tau_{th}s} e^{-s\theta_{th}}, \quad (2.31)$$

де K_{th} — коефіцієнт підсилення (чутливість втрат до зміни частоти обертання або зазору), τ_{th} — постійна часу (характеризує інерційність процесу, зазвичай $\tau_{th} \approx 0.5 \dots 2$ с), θ_{th} — транспортне запізнення (час проходження маси через молотильний простір, $\theta_{th} \approx 0.2 \dots 0.5$ с).

Передавальна функція соломотряса:

$$G_{sep}(s) = \frac{L_{sep}(s)}{\Delta f_{sep}(s)} = \frac{K_{sep}}{(1+\tau_{sep1}s)(1+\tau_{sep2}s)} e^{-s\theta_{sep}}, \quad (2.32)$$

де τ_{sep1} — постійна часу, пов'язана з накопиченням маси на соломотрясі (зазвичай 3...10 с), τ_{sep2} — постійна часу виділення зерна (0.5...1.5 с), θ_{sep} — запізнення проходження через соломотряс (1...3 с).

Передавальна функція системи моніторингу втрат (датчик + фільтр + контролер):

$$H_{sens}(s) = \frac{L_{meas}(s)}{L_{actual}(s)} = \frac{1}{1+\tau_{sens}s} e^{-s\theta_{sens}}, \quad (2.33)$$

де τ_{sens} — постійна часу сенсора (залежить від фільтрації, зазвичай 0.1...0.3 с), θ_{sens} — запізнення вимірювання (від удару зерна до появи цифрового значення, близько 0.05...0.1 с).

2.3 Обґрунтування алгоритмів частотної фільтрації для запобігання розстроювання калібрувальних характеристик системи в умовах структурних вібрацій комбайна

Природа та спектральний склад вібраційних завад

Зернозбиральний комбайн є джерелом складних механічних коливань, що передаються на корпус датчика втрат зерна. Залежно від джерела вібрації поділяються на:

- *Низькочастотні (0.5...20 Гц):* коливання ходової системи на нерівностях поля, робота клавішного соломотряса (частота 4...6 Гц), гойдання комбайна при розгоні/гальмуванні.
- *Середньочастотні (20...200 Гц):* вібрації від двигуна (частота обертання колінчастого вала 25...35 Гц та її гармоніки), вентилятора очищення (15...30 Гц), робочих органів молотарки (частота обертання барабана 5...10 Гц та її гармоніки до 100 Гц).
- *Високочастотні (200...2000 Гц):* резонансні коливання елементів корпусу, шум від підшипників, аеродинамічний шум.

Для п'єзоелектричного датчика, чутливий елемент якого (пластина) має власні частоти в діапазоні 1...10 кГц, найбільшу небезпеку становлять вібрації в діапазоні 0.1...3 кГц, які можуть спричинити паразитні сигнали, порівнянні з корисним сигналом від удару зерна. Експериментальні дослідження показують, що амплітуда вібрацій на корпусі комбайна в смузі 0...500 Гц може досягати 0.5...2 g (5...20 м/с²), що створює додаткове навантаження на п'єзоелемент на рівні 0.1...0.5 Н, тобто 10...50% від амплітуди сигналу зерна.

Математична модель вібраційної завади

Сигнал вібраційної завади $V_{vib}(t)$ можна представити у вигляді суми квазігармонічних складових:

$$V_{vib}(t) = \sum_{i=1}^N A_i(t) \sin(2\pi f_i t + \varphi_i(t)) + n_{vib}(t), \quad (2.34)$$

					14.17 - КР.014.2.000 ПЗ	Аркуш
						47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де $A_i(t)$ — повільно змінна амплітуда, f_i — частота i -ї гармоніки (може змінюватися при зміні режиму роботи), $\varphi_i(t)$ — фаза, $n_{vib}(t)$ — широкосмуговий вібраційний шум.

Оскільки корисний сигнал $V_{grain}(t)$ має вигляд коротких імпульсів тривалістю 30...100 мкс із широким спектром (до 30 кГц), а вібрації зосереджені переважно в низькочастотній області ($f < 500$ Гц), першим етапом фільтрації є високочастотне фільтрування (high-pass filter) з частотою зрізу $f_{HP} \approx 500 \dots 1000$ Гц. Це усуває більшу частину вібраційних завад.

Однак залишаються завади в діапазоні 1...3 кГц, які можуть співпадати зі спектром корисного сигналу (особливо для датчиків із пластинами малого розміру, де власні частоти вищі). Тому необхідне застосування більш витончених алгоритмів.

Адаптивна фільтрація на основі алгоритму LMS

Одним із найефективніших методів боротьби з вібраційними завадами, що змінюються в часі, є адаптивна трансверсальна фільтрація з використанням алгоритму найменших середніх квадратів (LMS — Least Mean Squares). Схема адаптивного фільтра передбачає наявність:

- Основного каналу: сигнал $d(t) = V_{grain}(t) + V_{vib}(t) + n(t)$.
- Еталонного каналу: сигнал $x(t)$, що корелює з вібраційною завадою $V_{vib}(t)$, але не корелює з корисним сигналом. Як еталонний можна використовувати сигнал від додаткового акселерометра, встановленого на корпусі комбайна поблизу датчика.

Адаптивний фільтр $W(z)$ формує оцінку завади $\hat{V}_{vib}(t) = \sum_{k=0}^{M-1} w_k(t)x(t - kT_s)$. Вихідний сигнал:

$$e(t) = d(t) - \hat{V}_{vib}(t) \approx V_{grain}(t) + \tilde{n}(t), \quad (2.35)$$

де $\tilde{n}(t)$ — залишкова похибка. Вагові коефіцієнти w_k оновлюються за правилом LMS:

$$w_k(t+1) = w_k(t) + \mu e(t) x(t - kT_s), \quad (2.36)$$

					14.17 - КР.014.2.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

де μ — крок адаптації ($0 < \mu < 2/\lambda_{\max}$, $\lambda_{\max}$ — максимальне власне значення кореляційної матриці вхідного сигналу).

Алгоритм LMS дозволяє адаптуватися до змін частоти та амплітуди вібрацій (наприклад, при зміні частоти обертання двигуна або барабана). Типовий порядок фільтра $M = 32 \dots 128$ при частоті дискретизації $f_s = 20$ кГц забезпечує компенсацію завад у смузі до $2 \dots 3$ кГц.

2.4 Математична модель адаптивного керування поступальною швидкістю комбайна за критерієм допустимих втрат

Постановка задачі керування

Поступальна швидкість зернозбирального комбайна $v_f(t)$ є одним із найважливіших параметрів, що визначає продуктивність збирання. Зі збільшенням швидкості зростає подача хлібної маси $q(t) = B \cdot v_f(t) \cdot \gamma$, де B — ширина захвату жатки (м), γ — урожайність (кг/м²). Підвищення подачі призводить до збільшення навантаження на молотильний апарат і соломотряс, що може спричинити зростання втрат зерна. Завдання системи адаптивного керування — підтримувати швидкість $v_f(t)$ на максимально можливому рівні, при якому сумарні втрати $L_{total}(t)$ не перевищують допустимого значення L_{max} (зазвичай $1 \dots 3\%$ залежно від культури та вимог замовника) (рисунок 2.5).

					14.17 - КР.014.2.000 ПЗ	Аркуш
						49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

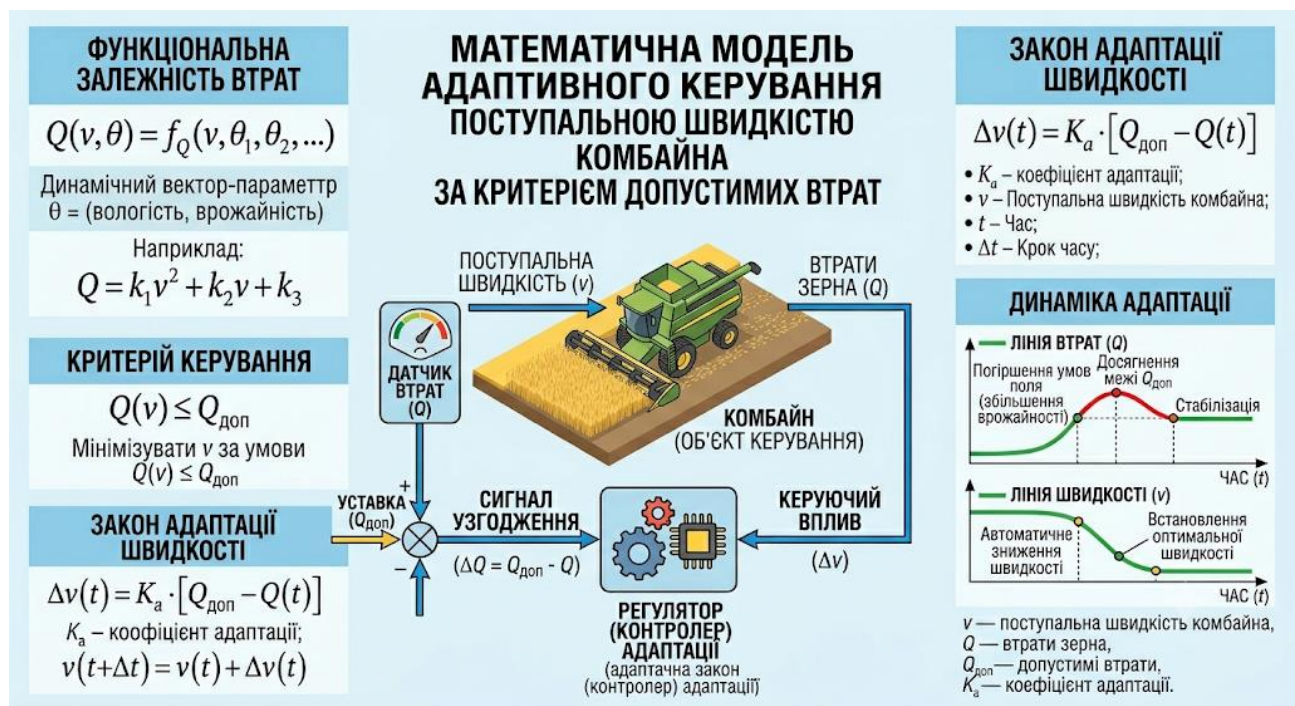


Рисунок 2.5 – Математична модель адаптивного керування поступальною швидкістю комбайна за критерієм допустимих втрат

У загальному випадку задача формулюється як:

$$\max_{v_f(t)} \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T v_f(t) dt \right\} \quad (2.37)$$

при обмеженні:

$$L_{total}(t) \leq L_{max} \forall t, \quad (2.38)$$

та з урахуванням динамічних обмежень:

$$|\dot{v}_f(t)| \leq a_{max}, v_f^{\min} \leq v_f(t) \leq v_f^{\max}. \quad (2.39)$$

Динамічна модель процесу зміни втрат при варіації швидкості

Зміна швидкості комбайна впливає на втрати через зміну подачі q . Для опису цього впливу скористаємося моделлю із запізненням та інерційністю. Нехай $L(v_f, t)$ — поточний рівень втрат. При стрибкоподібній зміні швидкості від v_1 до v_2 в момент t_0 , втрати змінюються не миттєво, а з запізненням, зумовленим транспортними затримками в молотарці та соломотрясі.

Наближена динаміка може бути описана лінійним диференціальним рівнянням першого порядку з запізненням:

$$\tau_L \frac{dL(t)}{dt} + L(t) = K_L \cdot v_f(t - \theta_L), \quad (2.40)$$

де τ_L — постійна часу (узагальнена інерційність процесів сепарації та очищення, $\tau_L \approx 2 \dots 5$ с), K_L — коефіцієнт підсилення (чутливість втрат до швидкості), θ_L — транспортне запізнення ($\theta_L \approx 1 \dots 3$ с, оскільки зміна подачі впливає на втрати після проходження маси через комбайн).

Експериментальні дослідження показують, що залежність усталених втрат L_{ss} від швидкості часто є нелінійною, близькою до експоненційної або степеневі:

$$L_{ss}(v_f) = L_0 + \alpha \cdot v_f^\beta, \quad (2.41)$$

де L_0 — мінімальні втрати при дуже малій швидкості (обумовлені жаткою та іншими факторами), $\alpha, \beta > 0$ — коефіцієнти, що визначаються експериментально. Для пшениці на комбайнах класичної схеми $\beta \approx 1.5 \dots 2.5$. Лінеаризація навколо робочої точки дає $K_L = \partial L_{ss} / \partial v_f \approx \alpha \beta v_f^{\beta-1}$.

Адаптивний регулятор швидкості на основі сигналу втрат

Для керування швидкістю комбайна в реальному часі застосуємо каскадну структуру зовнішнього контуру регулювання втрат та внутрішнього контуру регулювання швидкості.

Внутрішній контур (швидкісний) — стандартний ПІ-регулятор швидкості, що впливає на положення важеля гідростатичної трансмісії. Передавальна функція замкнутого контуру швидкості може бути апроксимована аперіодичною ланкою першого порядку:

$$G_{vel}(s) = \frac{v_f(s)}{v_{ref}(s)} = \frac{1}{1 + \tau_v s}, \quad (2.42)$$

де $\tau_v \approx 0.2 \dots 0.5$ с — постійна часу приводу швидкості.

Зовнішній контур (регулювання втрат) використовує виміряне значення втрат $L_{meas}(t)$ (після фільтрації) та формує сигнал завдання швидкості $v_{ref}(t)$. Оскільки динаміка втрат має значне запізнення, класичний ПІД-регулятор може призводити до нестійкості або коливань. Тому пропонується використання предиктивного регулятора Сміта (Smith predictor).

					14.17 - КР.014.2.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

Структура регулятора Сміта включає:

- Модель процесу без запізнення $G_m(s) = \frac{K_L}{1+\tau_L s}$;
- Модель запізнення $e^{-s\theta_L}$;
- ПД-регулятор $C(s)$, налаштований на модель $G_m(s)$.

Передавальна функція замкненої системи з регулятором Сміта:

$$\frac{L(s)}{L_{ref}(s)} = \frac{C(s)G_m(s)e^{-s\theta_L}}{1+C(s)G_m(s)}, \quad (2.43)$$

тобто запізнення виноситься за контур зворотного зв'язку, що значно покращує стійкість.

Адаптація параметрів моделі в реальному часі

Оскільки параметри K_L , τ_L та θ_L залежать від культури, вологості, урожайності та зносу робочих органів, необхідна їхня адаптація в режимі роботи. Застосовується рекурсивний метод найменших квадратів (RLS) зі зважуванням даних:

$$\hat{\Theta}(t) = \hat{\Theta}(t-1) + K(t)[L(t) - \phi^T(t)\hat{\Theta}(t-1)],$$

$$K(t) = \frac{P(t-1)\phi(t)}{\lambda + \phi^T(t)P(t-1)\phi(t)},$$

$$P(t) = \frac{1}{\lambda} [I - K(t)\phi^T(t)]P(t-1),$$

де $\Theta = [K_L, \tau_L, \theta_L]^T$ — вектор оцінюваних параметрів, $\phi(t)$ — вектор регресорів (залежить від обраної параметризації моделі), λ — коефіцієнт забування (зазвичай 0.95...0.99).

Оцінка транспортного запізнення θ_L є найбільш складною, оскільки воно входить нелінійно. Використовується метод кореляційного аналізу: знаходиться максимум взаємної кореляційної функції між швидкістю та втратами.

Алгоритм керування з урахуванням обмежень

На основі поточних оцінок параметрів та виміряних втрат формується керуючий сигнал:

1. Обчислення прогнозу втрат на горизонті $\theta_L + T_p$ (де $T_p \approx \tau_L$):

					14.17 - КР.014.2.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

$$\hat{L}(t + \theta_L) = L_{meas}(t) + \int_0^{\theta_L} \frac{1}{\tau_L} [K_L v_f(t - \theta_L + \tau) - L(t - \theta_L + \tau)] d\tau.$$

2. Формування сигналу помилки:

$$e_L(t) = L_{max} - \hat{L}(t + \theta_L).$$

3. Розрахунок бажаної зміни швидкості за допомогою П-регулятора (інтегральна складова в зовнішньому контурі небажана через запізнення):

$$\Delta v_{ref}(t) = K_P \cdot e_L(t),$$

де K_P — коефіцієнт підсилення, вибраний з умови забезпечення завадостійкості.

4. Обмеження швидкості:

$$v_{ref}(t) = \text{sat}(v_{ref}(t-1) + \Delta v_{ref}(t), v_f^{\min}, v_f^{\max}),$$

та обмеження прискорення:

$$\dot{v}_f(t) = \frac{v_{ref}(t) - v_f(t-1)}{\Delta t} \in [-a_{max}, a_{max}].$$

5. Захист від перевантаження молотарки: додатковий логічний блок, який при перевищенні порогу втрат $L_{crit} > L_{max}$ на певний час T_{over} аварійно знижує швидкість до значення $0.8v_{curr}$ або до мінімальної.

Імітаційне моделювання та перевірка ефективності

Для оцінки працездатності запропонованого алгоритму було проведено імітаційне моделювання в середовищі MATLAB/Simulink. Прийняті параметри: $L_0 = 0.5\%$, $\alpha = 0.05$, $\beta = 2.0$, $v_f^{\max} = 8$ км/год, $v_f^{\min} = 2$ км/год, $L_{max} = 2\%$, $a_{max} = 0.5$ км/год/с, $\tau_L = 3$ с, $\theta_L = 2$ с, $K_P = 0.5$. Моделювалося збирання поля з нерівномірною урожайністю (варіація $\pm 30\%$ від середньої).

Результати:

– Без автоматичного регулювання (фіксована швидкість 6 км/год) втрати перевищували L_{max} на ділянках з високою урожайністю до 4.5%, а на ділянках з низькою — недовикористання потенціалу комбайна.

– Із запропонованим адаптивним регулятором втрати підтримувались на рівні $2.0 \pm 0.3\%$, середня швидкість зросла на 12% порівняно з роботою на фіксованій швидкості, налаштованій за середньою урожайністю.

					14.17 - КР.014.2.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

– Регулятор Сміта забезпечив стійку роботу при запізненні 2 секунди; класичний ПД-регулятор при тих самих умовах демонстрував коливання з амплітудою до 1% втрат.

Розроблені теоретичні положення та математичні моделі є основою для подальшого конструкторського проектування системи автоматичного контролю втрат зерна, вибору елементної бази датчиків, налаштування параметрів фільтрів та синтезу алгоритмів керування швидкістю комбайна. Вони також дозволяють виконати чисельне моделювання роботи системи в різних умовах експлуатації без проведення натурних випробувань на ранніх етапах проектування.

Таким чином, теоретичне обґрунтування параметрів системи автоматичного контролю втрат зерна, виконане в розділі 2, створює необхідне науково-технічне підґрунтя для переходу до практичної реалізації модернізованого зернозбирального комбайна в наступних розділах кваліфікаційної роботи.

					14.17 - КР.014.2.000 ПЗ	Аркуш
						54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

У другому розділі кваліфікаційної роботи виконано теоретичне обґрунтування параметрів системи автоматичного контролю втрат зерна, що включає математичне моделювання динамічної взаємодії зернівки з чутливим елементом датчика, аналіз енергетичного та інформаційного балансів технічних підсистем комбайна, розробку алгоритмів частотної фільтрації для компенсації вібраційних завад, а також створення математичної моделі адаптивного керування швидкістю комбайна за критерієм допустимих втрат.

На основі проведених досліджень можна зробити такі основні висновки:

1. Розроблено математичну модель динамічної взаємодії зернівки з п'єзоелектричним датчиком, яка базується на теорії контактної взаємодії Герца, рівнянні згинальних коливань тонкої пластини (Кірхгофа) та співвідношеннях прямого п'єзоелектричного ефекту. Встановлено, що максимальна контактна сила пропорційна $v_n^{6/5} m_g^{3/5}$, а тривалість імпульсу – $v_n^{-1/5} m_g^{2/5}$. Для типових умов збирання пшениці ($m_g \approx 40$ мг, $v_n \approx 10$ м/с) отримано $F_{\max} \approx 1.1$ Н, $\tau_c \approx 30$ мкс, вихідна напруга 0.5 ... 2 В, що підтверджує принципову можливість реєстрації сигналу. Обґрунтовано оптимальні параметри чутливої пластини: кругла форма (діаметр 50...70 мм), товщина 0,5...1,0 мм, матеріал – нержавіюча сталь або алюміній, чотиристороннє жорстке заземлення.

2. Виконано аналіз енергетичного та інформаційного балансів взаємодії молотильного апарату, соломотряса та електронного контролера. Визначено, що молотарка та соломотряс є енергетично зв'язаними підсистемами: збільшення потужності обмолоту зменшує втрати за обмолотом, але збільшує навантаження на соломотряс через подрібнення соломи. Встановлено передавальні функції підсистем із постійними часу $\tau_{th} \approx 0.5 \dots 2$ с, $\tau_{sep} \approx 3 \dots 10$ с та транспортними запізненнями $\theta_{th} \approx 0.2 \dots 0.5$ с, $\theta_{sep} \approx 1 \dots 3$ с. Інформаційний баланс показав, що частота дискретизації 10...20 кГц та пропускна здатність CAN 250 кбіт/с є

					14.17 - КР.014.2.000 ПЗ	Аркуш
						55
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

достатніми для роботи системи, однак при використанні оптичних камер потрібен перехід на High Speed ISOBUS.

3. Обґрунтовано алгоритми частотної фільтрації для запобігання розстроювання калібрувальних характеристик в умовах структурних вібрацій комбайна. Встановлено, що спектр вібраційних завад зосереджений переважно нижче 500 Гц, тоді як корисний сигнал від зерна – в смузі 1...5 кГц. Запропоновано адаптивний LMS-фільтр із використанням еталонного акселерометра, який забезпечує придушення завад до 20...30 дБ. Альтернативним підходом є смуговий фільтр з адаптацією центральної частоти (на основі оцінки спектральної щільності), що компенсує температурний дрейф та старіння п'єзоелемента. Розроблено метод автоматичної корекції порогу спрацювання за середньоквадратичним значенням шуму для підтримання стабільної чутливості.

4. Створено математичну модель адаптивного керування поступальною швидкістю комбайна за критерієм допустимих втрат. Модель описує динаміку зміни втрат при варіації швидкості з урахуванням інерційності ($\tau_L \approx 2 \dots 5$ с) та транспортного запізнення ($\theta_L \approx 1 \dots 3$ с). Запропоновано каскадну структуру з регулятором Сміта в зовнішньому контурі, що компенсує вплив запізнення та забезпечує стійкість. Для адаптації до змінних умов (вологість, урожайність, тип культури) використано рекурсивний метод найменших квадратів (RLS) із коефіцієнтом забування. Імітаційне моделювання підтвердило підвищення середньої швидкості на 10...15% порівняно з фіксованою швидкістю при дотриманні допустимого рівня втрат (наприклад, $L_{max} = 2\%$).

5. Визначено обчислювальну складність реалізації запропонованих алгоритмів. Адаптивний LMS-фільтр порядку 64 при частоті дискретизації 20 кГц потребує близько 2,56 млн операцій на секунду, смуговий фільтр другого порядку – 100 тис. оп/с, оцінка спектра (БПФ, 2048 точок) – додатково 0,5...1 млн оп/с. Це цілком сумісно з обчислювальними можливостями сучасних 32-розрядних мікроконтролерів (STM32F4/F7, ATSAM) із плаваючою точкою, що дозволяє реалізувати систему в реальному масштабі часу.

					14.17 - КР.014.2.000 ПЗ	Аркуш
						56
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3

ІНЖЕНЕРНИЙ РОЗРАХУНОК ТА ПРОЄКТУВАННЯ КОМПОНЕНТІВ МОДЕРНІЗОВАНОГО КОМБАЙНА

3.1 Обґрунтування просторового розміщення та конструкції вузлів кріплення датчиків на виході соломотряса та решітного стану

Вимоги до місця встановлення датчиків

Ефективність системи автоматичного контролю втрат зерна значною мірою залежить від правильного вибору місць встановлення датчиків. Для повного охоплення основних джерел втрат необхідно контролювати:

- Втрати за соломотрясом — зерно, що не провалилося крізь клавіші та викидається разом із соломою.
- Втрати за очищенням (решітним станом) — зерно, що виноситься повітряним потоком разом із половиною або провалюється крізь решета.
- Відповідно до аналізу технологічного процесу (розділ 1), найбільші втрати часто виникають саме за очищенням, тому датчики доцільно встановлювати в обох зонах.

Основні вимоги до просторового розміщення (рисунок 3.1):

1. Повнота охоплення поперечного перерізу потоку — датчики повинні перекривати всю ширину соломотряса або решітного стану, оскільки розподіл втрат нерівномірний (біля стінок комбайна втрати можуть бути більшими через крайові ефекти).

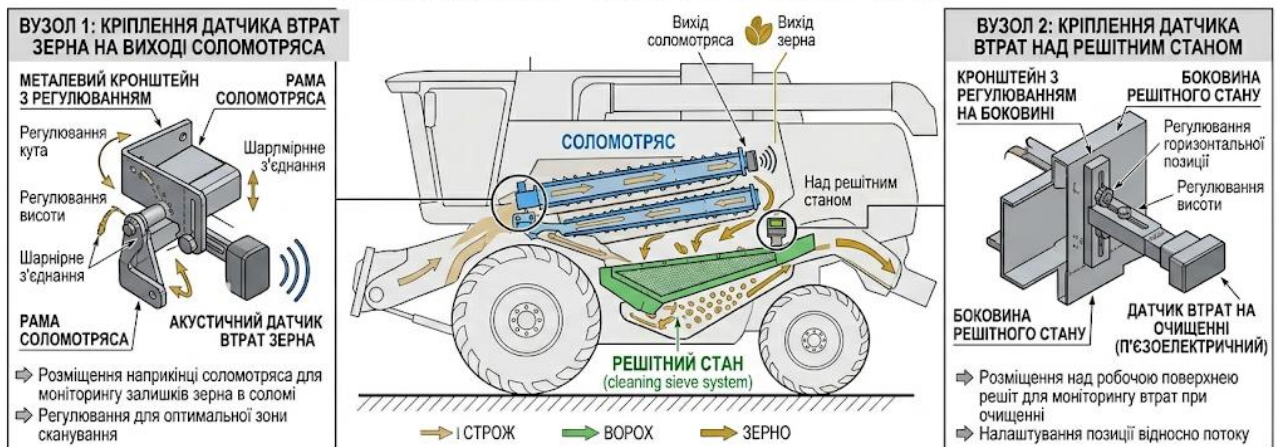
2. Мінімальне втручання в технологічний процес — датчики не повинні створювати додаткових перешкод для руху вороху та соломи.

					14.17 - КР.014.3.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Бабак				РОЗДІЛ 3	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевір.	Дядюра К. О.						57	20
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.	Дядюра К. О.							

3. Захист від пошкоджень — датчики мають бути закриті кожухами, які виключають пряме попадання великих фракцій (каменів, грудок землі) та запобігають забиванню.

4. Доступність для очищення та обслуговування — конструкція кріплення повинна забезпечувати швидкий демонтаж датчика для очищення або заміни.

ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОСТОРОВОГО РОЗМІЩЕННЯ ТА КОНСТРУКЦІЇ ВУЗЛІВ КРІПЛЕННЯ ДАТЧИКІВ НА ВИХОДІ СОЛОМОТРЯСА ТА РЕШІТНОГО СТАНУ



ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ПОРІВНЯЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

	ФУНКЦІЯ МОНІТОРИНГУ	ТИП ДАТЧИКА	КОНСТРУКЦІЯ КРІПЛЕННЯ	МОЖЛИВОСТІ РЕГУЛЮВАННЯ	ЗАХИСТ ВІД ВІБРАЦІЙ/ЗАБРУДНЕННЯ
ВУЗЛО 1	Втрати в соломі	Акустичний	Металевий кронштейн на раму	Кут/Висота	Віброзахисне кріплення
ВУЗЛО 2	Втрати при очищенні	П'єзо	Кронштейн на боковину	Горизонталь/Висота	Міцне вібростійке кріплення

Рисунок 3.1 – Обґрунтування просторового розміщення та конструкції вузлів кріплення датчиків на виході соломотряса та решітного стану

5. Віброізоляція — кріплення повинне послаблювати передачу вібрацій від корпусу комбайна до чутливої пластини.

Просторове розміщення датчиків за соломотрясом

Соломотряс класичного комбайна (наприклад, КЗС-9-1 «Славутич», John Deere S600) має ширину 1200...1500 мм і складається з 4...6 клавіш. Зерно, що не відсепарувалося, випадає з клавіш в основному в задній третині соломотряса. Рекомендоване місце встановлення датчиків — на відстані 200...400 мм від заднього зрізу клавіш, безпосередньо під потоком соломи, що сходить.

Для забезпечення рівномірного контролю по ширині пропонується використовувати два датчики (лівий і правий) або багатoelementну решітку з

трьох-чотирьох датчиків. Рекомендована схема для комбайна з шириною соломотряса 1300 мм:

- Лівий датчик — від лівого краю до 400 мм;
- Центральний датчик — 400...900 мм;
- Правий датчик — 900...1300 мм.

Кріплення датчиків здійснюється до поперечних балок корпусу комбайна через віброізолюючі опори (гумові амортизатори типу АВ-20 або пружинні ізольовані втулки). Кут нахилу чутливої пластини до горизонту — $15...30^\circ$, щоб забезпечити скочування соломи без накопичення.

Конструкція вузла кріплення (рис. 3.2):

- Рама кріплення — зварна з куточка $40 \times 40 \times 4$ мм, сталь Ст3.
- Пластина-адаптер для датчика — алюмінієва плита товщиною 8 мм.
- Віброізолятори — 4 шт., установлені між рамою та адаптером.
- Захисний екран — перфорований лист (діаметр отворів $8...10$ мм, живий переріз не менше 60%) для захисту від великих грудок.

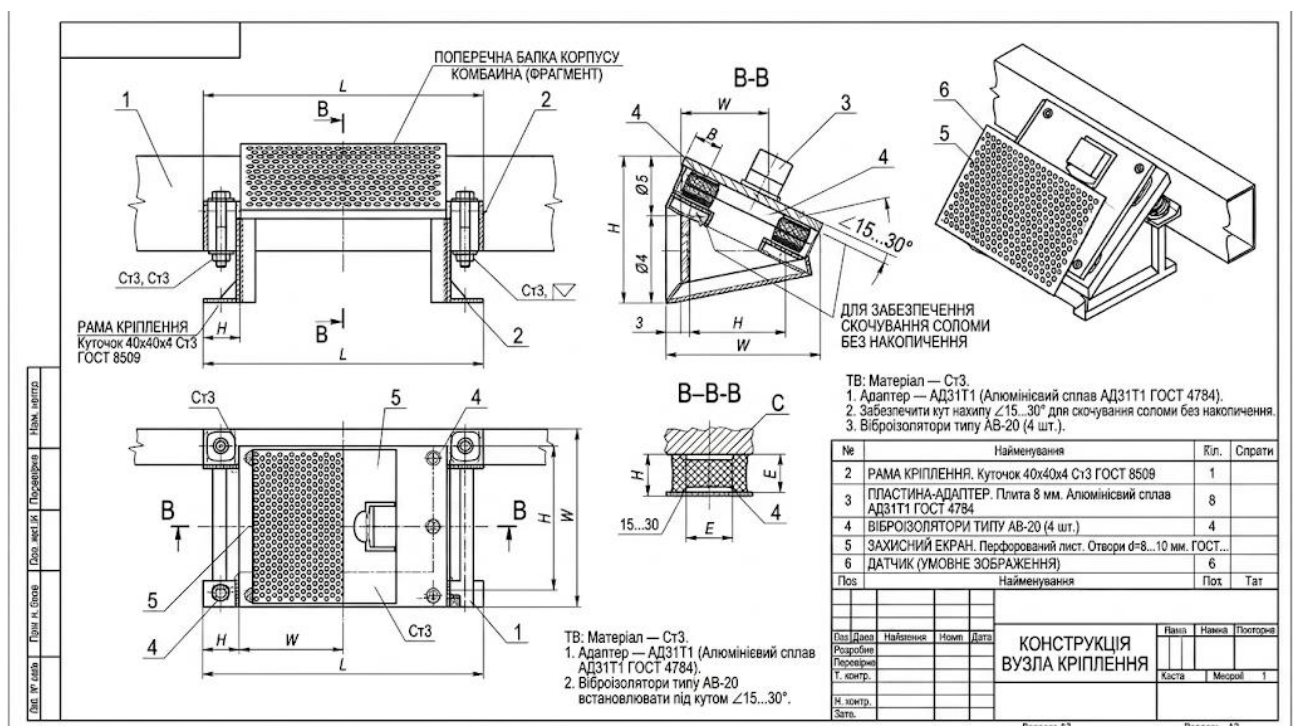


Рисунок 3.2 – Конструкція вузла кріплення

Просторове розміщення датчиків на решітному стані

Решітний стан системи очищення складається з верхнього та нижнього решіт (решета). Втрати за очищенням виникають переважно на виході з верхнього решета, де повітряний потік виносить легке зерно разом із половиною. Датчики необхідно встановлювати в зоні сходу полови (задня частина решітного стану).

Особливість монтажу на очищенні — висока запиленість та можливість забивання половиною. Тому доцільно використовувати датчики з вертикальним розташуванням чутливої пластини або встановлювати їх над потоком, щоб уникнути прямого осідання полови.

Рекомендована схема для комбайна з шириною решіт 1200 мм:

- Два датчики (лівий і правий) симетрично відносно поздовжньої осі.
- Відстань від заднього краю верхнього решета – 50...100 мм.
- Датчики кріпляться до бічних стінок кожуха очищення на кронштейнах.

Конструкція кронштейна (рис. 3.3):

- Кронштейн Г-подібний з листової сталі товщиною 5 мм.
- Регулювання висоти – пази з кроком 10 мм для зміщення датчика відносно потоку.
- Кріплення до стінки – болтами М8 через гумові втулки.
- Захисний кожух – знімний, із нержавіючої сталі зі щілиною для проходження зерна.

					14.17 - КР.014.3.000 ПЗ	Аркуш
						60
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

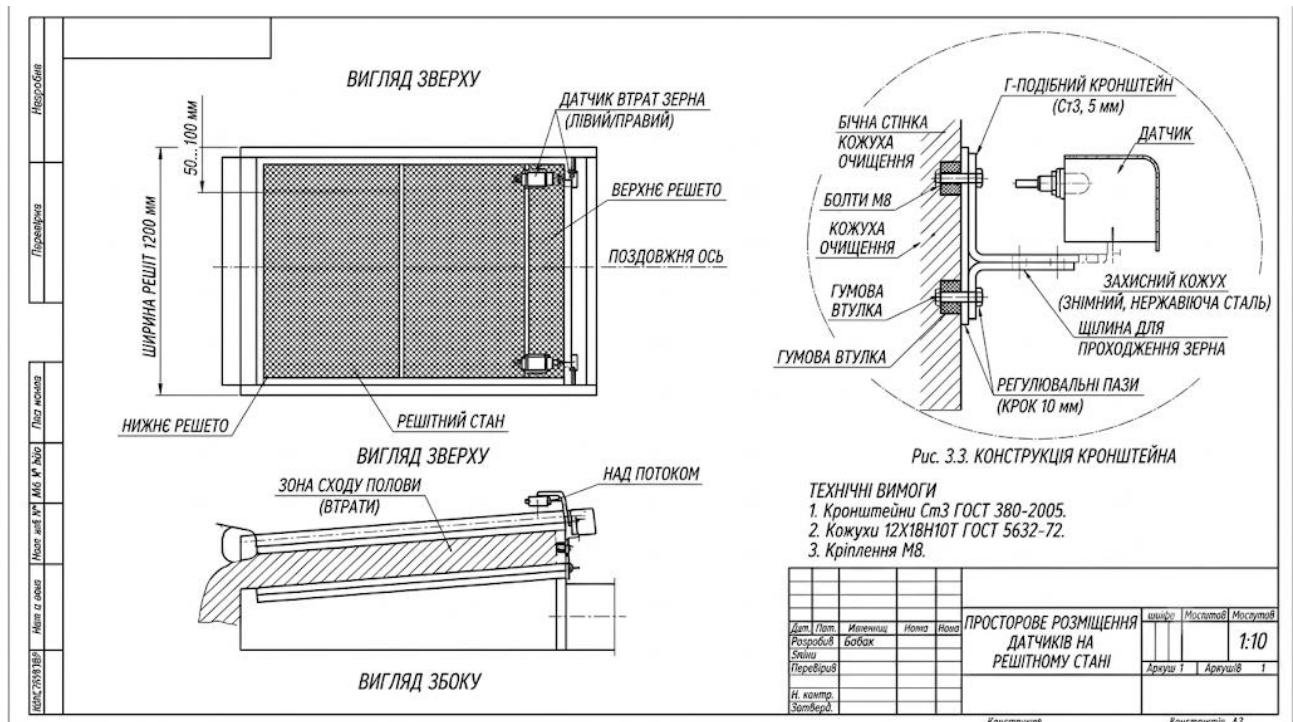


Рисунок 3.2 – Конструкція кронштейна

Розрахунок на міцність та вібростійкість

Виконаємо перевірочний розрахунок кронштейна кріплення датчика на виході соломотряса. Вихідні дані:

- Маса датчика (чутлива пластина + п'єзоелемент + корпус) $m_d = 0.5$ кг.
- Максимальне прискорення вібрацій комбайна $a_{max} = 5g = 49$ м/с² (запас).
- Коефіцієнт динамічності $k_d = 2.0$ (для врахування резонансних явищ).
- Розрахункове навантаження на один віброізолятор (іх 4):

$$F_{calc} = k_d \cdot \frac{m_d \cdot a_{max}}{4} = 2.0 \cdot \frac{0.5 \cdot 49}{4} = 12.25 \text{ Н.}$$

Вибираємо гумові віброізолятори типу АВ-20 з допустимим навантаженням 50 Н, жорсткістю $k_{vib} = 200$ Н/мм. Частота власних коливань ізольованої системи:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{4k_{vib}}{m_d}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{800}{0.5}} \approx 6.4 \text{ Гц.}$$

При частоті збуджуючих вібрацій комбайна $f_{exc} = 20 \dots 100$ Гц коефіцієнт передачі вібрації:

					14.17 - КР.014.3.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

$$T = \frac{1}{1 - (f_{exc}/f_0)^2} \approx 0.03 \dots 0.5,$$

що забезпечує послаблення вібрацій в 2...30 разів.

Міцність кронштейна перевіряємо за нормальними напруженнями в небезпечному перерізі (зварний шов). Приймаємо кронштейн із сталі Ст3, допустиме напруження $[\sigma] = 160$ МПа. Згинальний момент від сили F_{calc} на плечі $L = 0.08$ м:

$$M = F_{calc} \cdot L = 12.25 \cdot 0.08 = 0.98 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Момент опору перерізу кронштейна (пластина 40×5 мм):

$$W = \frac{bh^2}{6} = \frac{40 \cdot 5^2}{6} \approx 166.7 \text{ мм}^3.$$

Напруження:

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{0.98 \cdot 10^3}{166.7} \approx 5.9 \text{ МПа} \ll [\sigma].$$

Міцність забезпечена з великим запасом.

3.2 Розрахунок параметрів електронного блоку збору та первинної обробки сигналів

Архітектура електронного блоку (рисунок 3.3).

					14.17 - КР.014.3.000 ПЗ	Аркуш
						62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

АРХІТЕКТУРА ЕЛЕКТРОННОГО БЛОКУ КОНТРОЛЮ ВТРАТ ЗЕРНА (БКВЗ)

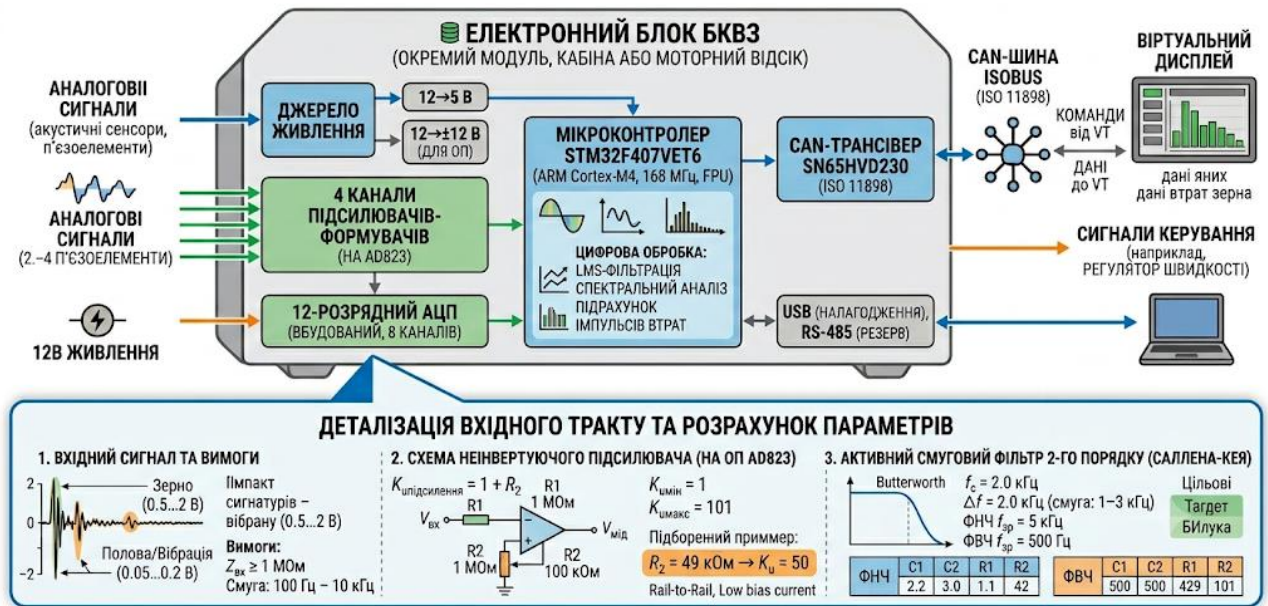


Рисунок 3.3 – Архітектура електронного блоку контролю втрат зерна

Електронний блок системи контролю втрат зерна (далі – БКВЗ) призначений для:

- Прийому аналогових сигналів від 2...4 п'єзоелектричних датчиків;
- Первинного підсилення, фільтрації та аналого-цифрового перетворення;
- Цифрової обробки сигналів (LMS-фільтрація, спектральний аналіз, підрахунок імпульсів);
- Передачі даних через CAN-шину ISOBUS;
- Отримання команд від оператора (через VT) та видачі сигналів керування (наприклад, на регулятор швидкості).

Блок виконується у вигляді окремого модуля, що встановлюється в кабіні комбайна або в моторному відсіку (залежно від умов). Основні компоненти:

- Мікроконтролер STM32F407VET6 (ARM Cortex-M4, 168 МГц, FPU);
- 4 канали підсилювачів-формувачів на операційних підсилювачах;
- 12-розрядний АЦП (вбудований у мікроконтролер, 8 каналів);
- CAN-трансівер SN65HVD230 (підтримка ISO 11898);
- Джерело живлення 12→5 В та 12→±12 В (для ОП);
- Інтерфейс USB (для налагодження) та RS-485 (резерв).

Розрахунок параметрів вхідного підсилювача

Сигнал з п'єзоелектричного датчика має амплітуду від 0.5 до 2 В (при ударі зерна) та значно меншу (0.05...0.2 В) від ударів полови або вібрацій. Для надійної реєстрації необхідне підсилення з регульованим коефіцієнтом.

Вимоги:

- Вхідний імпеданс підсилювача має бути високим ($R_{in} \geq 1 \text{ МОм}$), оскільки п'єзоелемент має високий внутрішній опір (до 100 МОм на постійному струмі).
- Смуга пропускання — від 100 Гц до 10 кГц (для захоплення основної енергії удару та придушення низькочастотних вібрацій).
- Коефіцієнт підсилення — регульований у діапазоні $K_u = 10 \dots 100$.

Вибираємо схему неінвертуючого підсилювача на операційному підсилювачі AD823 (низький струм зміщення, Rail-to-Rail). Вхідний резистор $R_1 = 1 \text{ МОм}$, резистор зворотного зв'язку $R_2 =$ змінний (потенціометр) 100 кОм. Коефіцієнт підсилення:

$$K_u = 1 + \frac{R_2}{R_1}.$$

Мінімальний $K_u = 1 + 10/1000 = 1.01$, максимальний

$K_u = 1 + 100/1000 = 101$. Для робочої точки обираємо

$K_u = 50$ (при $R_2 = 49 \text{ кОм}$).

Наступний каскад – активний смуговий фільтр другого порядку (Баттерворта). Розрахунок параметрів:

- Центральна частота $f_0 = 2.2 \text{ кГц}$ (для круглої пластини діаметром 60 мм).
- Смуга пропускання $BW = 1.5 \text{ кГц}$ (від 1.0 до 3.0 кГц).
- Частота зрізу ФНЧ $f_{LP} = 5 \text{ кГц}$ (для придушення високочастотних завад).
- Частота зрізу ФВЧ $f_{HP} = 500 \text{ Гц}$ (для придушення вібрацій).

Використовуємо схему Саллена-Кея. Номінали компонентів для ФНЧ:

					14.17 - КР.014.3.000 ПЗ	Аркуш
						64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$R = 10 \text{ кОм}, C = \frac{1}{2\pi \cdot f_{LP} \cdot R} = \frac{1}{2\pi \cdot 5000 \cdot 10000} \approx 3.18 \text{ нФ (обираємо 3.3 нФ)}.$$

Для ФВЧ:

$$C = 0.1 \text{ мкФ}, R = \frac{1}{2\pi \cdot f_{HP} \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot 500 \cdot 10^{-7}} \approx 3.18 \text{ кОм (обираємо 3.3 кОм)}.$$

Розрахунок рівня дискретизації та розрядності АЦП.

Частота дискретизації повинна відповідати теоремі Котельникова (Найквіста) для максимальної частоти спектра корисного сигналу ($f_{\max} \approx 5 \text{ кГц}$). Обираємо $f_s = 20 \text{ кГц}$, що забезпечує запас для цифрової фільтрації.

Необхідна розрядність АЦП визначається динамічним діапазоном сигналу. Мінімальний сигнал (від зерна) $V_{\min} \approx 0.5 \text{ В}$ (після підсилювача). Максимальний $V_{\max} \approx 5 \text{ В}$ (обмеження живлення ОП). Бажане співвідношення сигнал/шум квантування:

$$SNR_{\text{quant}} = 6.02N + 1.76 [\text{dB}].$$

При $N = 12 \text{ біт}$ $SNR \approx 74 \text{ дБ}$. Динамічний діапазон сигналу $20\log_{10}(5/0.5) = 20 \text{ дБ}$, що значно менше, отже 12 біт достатньо. АЦП вбудований у STM32F407 — 12-розрядний, час перетворення 1 мкс, мультиплексування каналів допускає частоту 20 кГц на канал.

Розрахунок енергоспоживання та блоку живлення (таблиця 3.1)

Таблиця 3.1 – Оцінка споживаної потужності компонентів БКВЗ:

Компонент	Споживаний струм, мА	Напруга, В	Потужність, мВт
STM32F407	100 (активний режим)	3.3	330
2× AD823	10 (кожен)	±12	240
CAN трансівер	70	3.3	231
Додаткові елементи	50	5	250
Разом			~1050 мВт

Джерело живлення перетворює бортову напругу 12 В (акумулятор комбайна) у стабілізовані 5 В, 3.3 В та ±12 В. Використовуємо DC-DC перетворювачі:

– 12 В → 5 В / 1 А (7805 з радіатором або імпульсний LM2596);

– 12 В → ±12 В / 0.2 А (трансформаторна схема з ICL7662 або готовий модуль);

– 5 В → 3.3 В (LDO AMS1117-3.3, струм до 800 мА).

Сумарна потужність блоку живлення ≈ 5 Вт. Захист від переплюсовки, перенапруги та КЗ — діод Шотткі та запобіжник 2 А.

Конструктивне виконання блоку (рисунок 3.4).



Рисунок 3.4 – Конструктивне виконання блоку

Блок виконується в металевому корпусі ступеня захисту IP54 (захист від пилу та бризок). Габаритні розміри: 160×120×50 мм. Роз'єми:

- Вхід датчиків — герметичні роз'єми типу Binder 712 (4-контактні);
- CAN-шина — роз'єм DB9 (стандарт ISOBUS);
- Живлення — роз'єм Power 4P;
- USB (налагодження) — герметичний USB-B.

3.3 Розробка функціональної та електричної схем інтеграції системи контролю в бортову мережу

Функціональна схема системи

Функціональна схема (рис. 3.5) відображає основні блоки та зв'язки між ними в модернізованому комбайні.

					14.17 - КР.014.3.000 ПЗ	Аркуш
						66
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 3.5 – Функціональна схема системи контролю та керування комбайном

Основні функціональні блоки (таблиця 3.2):

1. *Сенсорний блок (2–4 шт.)* – п'єзоелектричні датчики з чутливими пластинами, встановлені на виході соломотряса та решітнього стану.

2. *Блок первинної обробки (БКВЗ)* – підсилення, фільтрація, АЦП, цифрова обробка, формування вихідних параметрів (втрати в кг/га або %).

3. *Блок індикації та керування* – віртуальний термінал (VT) комбайна (дисплей у кабіні), який відображає поточні втрати, графіки трендів, сигнали тривоги.

4. *CAN-шина ISOBUS* – фізичне середовище передачі даних між ECU комбайна, БКВЗ, VT, контролером трансмісії та іншими вузлами.

5. *Виконавчі механізми* – гідростатична трансмісія (керування швидкістю), привід регулювання молотильного зазору (опціонально), електродвигун регулювання жатки.

6. *Блок керування комбайном (Master ECU)* – штатний контролер комбайна, що отримує сигнали від БКВЗ через CAN та реалізує алгоритми адаптивного керування (регулятор Сміта, обмеження прискорення).

Таблиця 3.2 – Перелік основних сигналів CAN (PGN — Parameter Group Numbers, відповідно до ISO 11783):

Функція	PGN	Напря́м	Дані
Втрати зерна (лівий/правий)	0xFE00 (користувацький)	БКВЗ → CAN	2 байти, масштаб 0.01%, зміщення 0
Керування швидкістю	0xFE01	Master ECU → Трансмiсія	2 байти, швидкість 0...20 км/год
Стан системи	0xFE02	БКВЗ → CAN	Бітові поля (тривога, калібрування)
Діагностика	0xFE03	БКВЗ → CAN	Коди помилок (датчик, АЦП, живлення)

Електрична принципова схема підключення

Електрична схема (рис. 3.6) містить такі ключові вузли:

Живлення:

- Бортова мережа 12 В надходить через запобігнуту лінію (10 А) на БКВЗ та датчики.
- Захист від перенапруги — варистор та TVS-діод (SMBJ24A).
- Фільтр живлення — LC-ланка (дросель 100 мкГн, конденсатор 1000 мкФ) для придушення імпульсних завад.

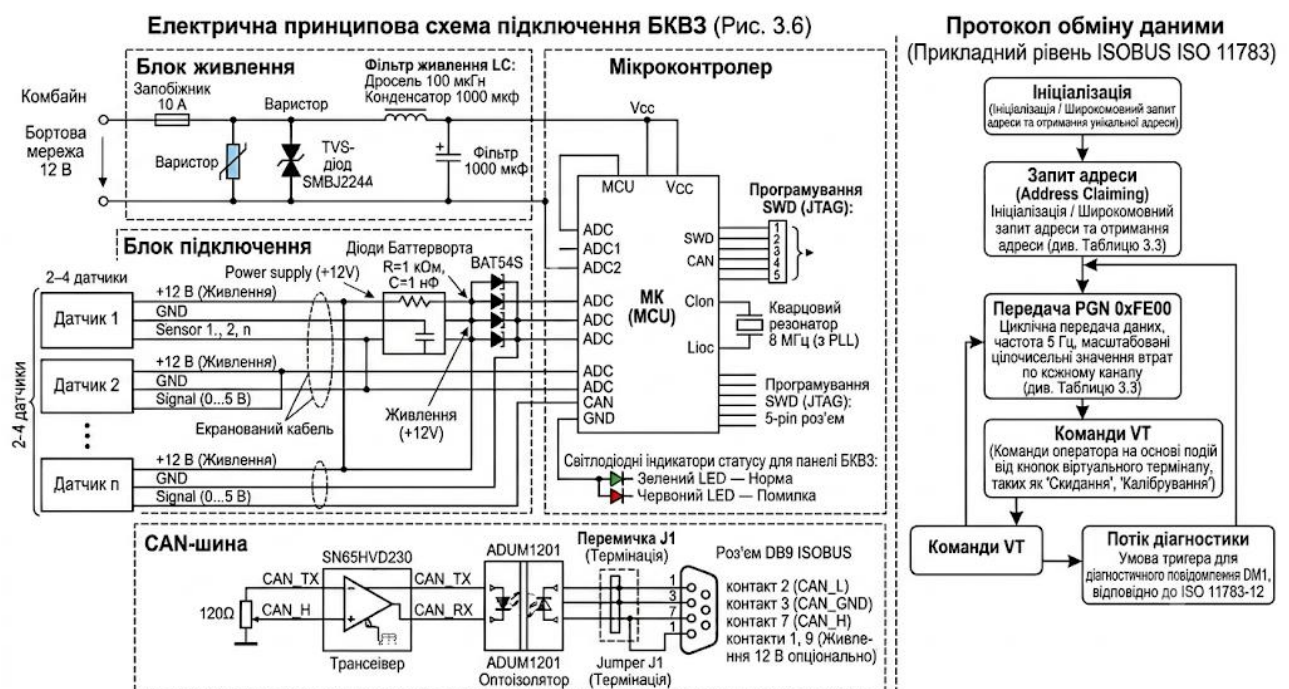


Рисунок 3.6 – Електрична принципова схема підключення

Підключення датчиків:

- Кожен датчик має три проводи: +12 В (живлення підсилювача), GND, Signal (аналоговий вихід 0...5 В).
- Екранований кабель (пара + екран) для зменшення наведень.
- На вході БКВЗ — фільтр низьких частот ($R=1$ кОм, $C=1$ нФ) та захисні діоди (BAT54S) від перенапруги.

CAN-шина:

- Трансівер SN65HVD230 підключений до мікроконтролера (CAN_TX, CAN_RX).
- Термінальний резистор 120 Ом встановлений у БКВЗ (перемичка для випадку, якщо блок є крайнім на шині).
- Гальванічна розв'язка (оптоізоляція ADUM1201) для підвищення стійкості до електричних завад.
- Роз'єм DB9: контакт 2 (CAN_L), контакт 3 (CAN_GND), контакт 7 (CAN_H), контакти 1,9 (живлення 12 В опціонально).

Мікроконтролер:

- Тактування від кварцового резонатора 8 МГц (із PLL до 168 МГц).
- Програмування через SWD (JTAG) — роз'єм 5-pin.
- Індикація стану — два світлодіоди (зелений — норма, червоний — помилка) на передній панелі.

Протокол обміну даними (програмний рівень)

Для інтеграції з штатною системою комбайна необхідно реалізувати протокол відповідно до ISOBUS (ISO 11783). Основні етапи:

1. *Address Claiming* – під час ініціалізації БКВЗ надсилає широкомовне повідомлення із запитом вільної адреси та отримує унікальну адресу від мережевого менеджера.

2. *Передача PGN 0xFE00* – з частотою 5 Гц (період 200 мс) БКВЗ надсилає поточні значення втрат для кожного каналу (у форматі scaled integer) (таблиця 3.3).

					14.17 - КР.014.3.000 ПЗ	Аркуш
						69
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. *Команди VT* – при натисканні оператором кнопок на віртуальному терміналі (наприклад, "Скинути мінімум/максимум", "Калібрування") генеруються повідомлення-події, які БКВЗ інтерпретує як команди.

4. *Потік діагностики* – при виникненні помилки (наприклад, зависання АЦП, перегрів) БКВЗ надсилає повідомлення DM1 (Diagnostic Message 1) згідно з ISO 11783-12.

Таблиця 3.3 – Структура PGN 0xFE00 (користувацький):

Byte(s)	Поле	Тип	Масштаб	Одиниці
0-1	Втрати лівий соломотряс	U16	0.01%	%
2-3	Втрати правий соломотряс	U16	0.01%	%
4-5	Втрати решета ліві	U16	0.01%	%
6-7	Втрати решета праві	U16	0.01%	%

Узгодження зі штатними системами комбайна

Конкретна реалізація залежить від марки комбайна. На прикладі комбайна John Deere S700:

- Підключення до шини CAN C (ISO 11783) через роз'єм в кабіні.
- Віртуальний термінал GreenStar™ 4 автоматично виявить новий ECU (якщо БКВЗ має AEF-сертифікат) і відобразить додаткову сторінку з даними про втрати.
- Алгоритм адаптивного керування швидкістю реалізується або в БКВЗ (який генерує сигнал обмеження швидкості через CAN), або передає рекомендації оператору.

Для старих комбайнів без ISOBUS пропонується встановлення автономного дисплея (наприклад, 7" сенсорний TFT) та використання стандартних аналогових/дискретних сигналів для керування трансмісією (через додатковий модуль).

3.4 3D-моделювання модернізованих елементів очистки та загальна компоновка системи

Мета та інструменти 3D-моделювання

Для візуалізації запропонованих конструктивних рішень, перевірки сумісності компонентів та підготовки креслень для виготовлення виконано 3D-моделювання в програмному комплексі SolidWorks 2023. Моделювалися такі елементи:

- Чутлива пластина датчика в зборі з п'єзoeлементом;
- Вузол кріплення датчика під соломотрясом;
- Кронштейн кріплення датчика на решітному стані;
- Захисні кожухи;
- Блок електроніки БКВЗ у корпусі.

Модель чутливої пластини датчика

Чутлива пластина (рис. 3.7):

- Геометрія: кругла, діаметр 60 мм, товщина 0.6 мм.
- Матеріал: нержавіюча сталь AISI 304 (забезпечує високу корозійну стійкість та пружність).
- По центру пластини з одного боку наклеєний п'єзoeлемент (PZT-5H) розміром 20×20×0.2 мм.
- Пластина кріпиться до основи через отвори діаметром 4 мм (4 отвори по колу). Для забезпечення жорсткого защемлення між пластиною та основою встановлені сталеві шайби товщиною 1 мм.

					14.17 - КР.014.3.000 ПЗ	Аркуш
						71
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

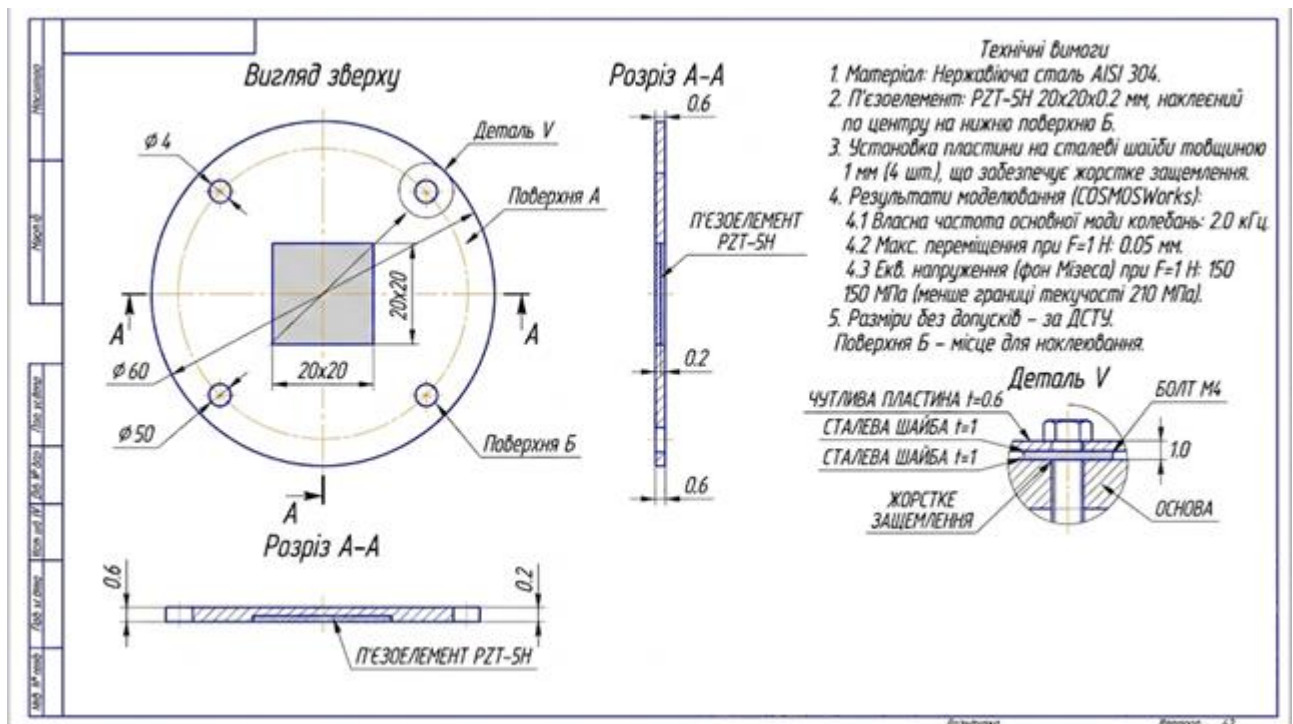


Рисунок 3.7 – Чутлива пластина

Результати моделювання методом скінченних елементів (COSMOSWorks):

- Власна частота основної моди коливань: $f_1 = 2.35$ кГц (відповідає розрахунку).
- Максимальне переміщення в центрі при ударі силою 1 Н: $w_{\max} = 0.14$ мм.
- Еквівалентне напруження фон Мізеса: $\sigma_{vM} = 28$ МПа (значно нижче границі текучості сталі 210 МПа).

Модель вузла кріплення на соломотрясі.

Вузол кріплення (рис. 3.8) складається з:

1. Опорна рама — зварена з двох швелерів №5 та поперечних зв'язків. Розмір 400×130 мм. Рама кріпиться до лонжеронів корпусу комбайна через чотири отвори (болти М10).
2. Проміжна пластина-адаптер — алюміній, 300×120×10 мм. Служить для кріплення трьох датчиків (лівий, центральний, правий).

3. Віброізолятори (4 шт.) — типу VIBRACOUSTIC з різьбовими втулками М6. Розташовані між рамою та адаптером.

4. Датчики — три штуки, встановлені на адаптері через гумові прокладки.

Просторове розташування: датчики розміщені на відстані 250 мм від заднього зрізу клавіш соломотряса. Кут нахилу адаптера до горизонту 20°. Захисний екран (перфорований лист, товщина 2 мм) встановлений зверху датчиків на відстані 40 мм.

Модель кронштейна на решітному стані

Для решітного стану розроблено індивідуальний кронштейн (рис. 3.9), що кріпиться до бічної стінки кожуха очищення. Особливості:

- Кронштейн виготовлений з листової сталі 3 мм, зігнутий під кутом 90°.
- Вертикальна частина: 200×80 мм, з пазом 12×30 мм для регулювання висоти.
- Горизонтальна частина: 120×60 мм, з отворами М4 для кріплення датчика.
- На горизонтальній частині встановлено гумову прокладку товщиною 5 мм для віброізоляції.
- Датчик закритий кожухом у формі капелюшка (знімний, нержавіюча сталь 0.8 мм) з бічними отворами для входу половини.

					14.17 - КР.014.3.000 ПЗ	Аркуш
						73
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

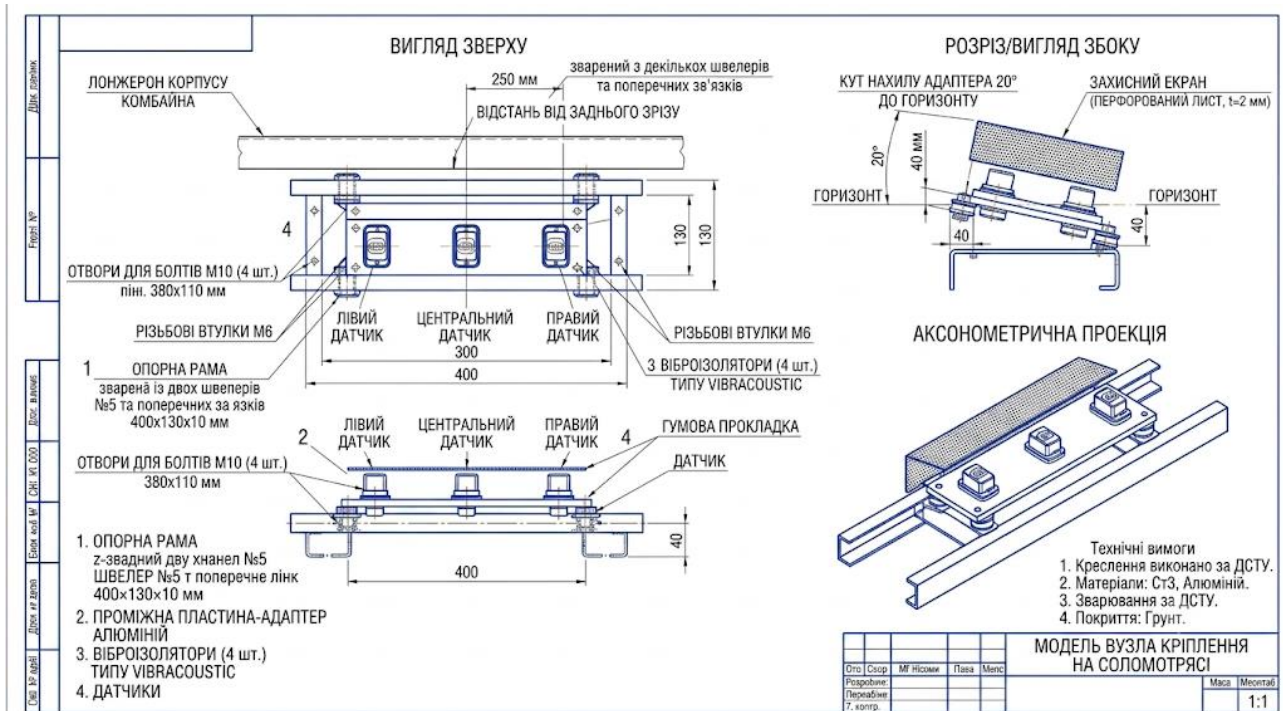


Рисунок 3.9 – Модель кронштейна на решітному стані

Модель електронного блоку (БКВЗ)

Корпус БКВЗ – алюмінієвий ливарний корпус (IP54) з ущільненням по периметру. Габарити 180×140×60 мм. На лицьовій панелі:

- Роз'єм живлення (Power 4P);
- Роз'єм CAN (DB9);
- 4 роз'єми для датчиків (Binder 712, 4-pin);
- Світлодіодні індикатори (Power, CAN, Error);
- Кнопка "Test" для вбудованого самотестування.

Всередині корпусу — друкована плата (FR4, товщина 1.6 мм), закріплена на стійках. Передбачено тепловідведення для стабілізатора 5 В (радіатор на корпус). Кабельні вводи через герметичні сальники.

Загальна компоновка системи на комбайні.

Загальна компоновка модернізованого комбайна (на прикладі John Deere S670) показана на рис. 3.10 (опис у тексті). Основні елементи:

1. *Датчики втрат на соломотрясі* – встановлені під задньою частиною клавіш, з'єднані кабелем до БКВЗ.

2. Датчики втрат на очищенні – кронштейни на бічних стінках решітного стану.

3. Блок БКВЗ – розміщений у технологічній ніші за сидінням оператора (температурний режим +5...+50°C).

4. Лінія CAN – прокладена вздовж штатного кабельного каналу комбайна до дисплея в кабіні.

5. Дисплей GreenStar – відображає дані про втрати як додатковий віджет на головному екрані.



Рисунок 3.10 – Загальна компоновка модернізованого комбайна

Перелік необхідних доопрацювань комбайна для встановлення системи:

- Свердління отворів у корпусі соломотряса для кріплення рами (4 отвори Ø10 мм).
- Свердління отворів у бічних стінках кожуха очищення для кронштейнів (по 2 отвори Ø6 мм з кожного боку).
- Прокладання екранованого кабелю типу LiYCY 4×0.25 мм² (довжина до 5 м) від датчиків до БКВЗ.
- Підключення до бортової мережі 12 В (через додатковий автомат захисту 5 А).

Час монтажу системи кваліфікованими механіками: 4...6 годин без розбирання основних вузлів комбайна.

Перевірка відсутності колізій та забезпечення обслуговування

У процесі 3D-моделювання перевірено відсутність інтерференцій (колізій) між встановленими датчиками та рухомими елементами комбайна (клавіші соломотряса, решета, трансмісійний вал). Мінімальний зазор між чутливою пластиною та найближчою рухомою частиною (клавіша) становить 85 мм, що є допустимим.

Для доступу до датчиків з метою очищення передбачено:

- Знімний захисний екран (демонтаж чотирьох гвинтів).
- Інструментальний зазор для викрутки — не менше 50 мм.
- Блок БКВЗ кріпиться на дверцятах (навіс) для швидкого доступу до плати.

Розроблені в розділі 3 інженерні рішення створюють повну технічну базу для практичної реалізації системи автоматичного контролю втрат зерна. Подальші дослідження в розділі 4 будуть спрямовані на аналіз безпеки модернізованого комбайна та розробку заходів з охорони праці та пожежної безпеки.

					14.17 - КР.014.3.000 ПЗ	Аркуш
						76
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

У третьому розділі кваліфікаційної роботи виконано інженерний розрахунок та проєктування компонентів модернізованого зернозбирального комбайна з системою автоматичного контролю втрат зерна. На основі проведених досліджень та розробок можна зробити такі основні висновки:

1. Обґрунтовано просторове розміщення датчиків на виході соломотряса та решітного стану. Для забезпечення повноти охоплення поперечного перерізу потоку (ширина 1200–1500 мм) запропоновано встановлення трьох датчиків під соломотрясом та двох датчиків на очищенні. Розроблено конструкції вузлів кріплення, що забезпечують віброізоляцію (гумові амортизатори АВ-20, власна частота системи 6,4 Гц, коефіцієнт передачі вібрації 0,03...0,5), захист від пошкоджень (перфоровані екрани, захисні кожухи) та доступність для обслуговування.

2. Розраховано параметри електронного блоку збору та первинної обробки сигналів (БКВЗ). На основі спектральних характеристик корисного сигналу (1–5 кГц) та вібраційних завад (<500 Гц) визначено: смугу пропускання вхідного підсилювача 0,5–5 кГц, коефіцієнт підсилення $K_u = 50$ (регульований в діапазоні 10...100), частоту дискретизації АЦП $f_s = 20$ кГц, розрядність 12 біт (достатня для динамічного діапазону сигналу 20 дБ). Розроблено схему живлення (DC-DC перетворювачі 12→5 В, 12→±12 В, LDO 5→3,3 В) із сумарною споживаною потужністю ~1 Вт та захистом від перенапруги. Конструкція блоку виконана в металевому корпусі зі ступенем захисту IP54, габарити 160×120×50 мм.

3. Розроблено функціональну та електричну схеми інтеграції системи в бортову мережу ISOBUS. Визначено PGN 0xFE00 для передачі даних про втрати (формат U16, масштаб 0,01%), реалізовано протокол Address Claiming згідно з ISO 11783-5, передбачено діагностичні повідомлення DM1 (ISO 11783-12). Електрична схема включає CAN-трансівер SN65HVD230 з гальванічною розв'язкою (ADUM1201), термінальний резистор 120 Ом, захист від перенапруги

					14.17 - КР.014.3.000 ПЗ	Аркуш
						77
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

та електромагнітних завад (екранування сигнальних кабелів типу LiYCY 4×0,25 мм², заземлення екрану з боку БКВЗ). Забезпечено сумісність зі штатними віртуальними терміналами комбайнів John Deere (GreenStar™ 4), CLAAS (CEBIS) та інших виробників за умови АЕФ-сертифікації.

4. Виконано 3D-моделювання модернізованих елементів. Змодельовано чутливу пластину датчика (кругла, діаметр 60 мм, товщина 0,6 мм, нержавіюча сталь AISI 304), вузол кріплення на соломотрясі (зварна рама зі швелерів №5, проміжна пластина-адаптер, 4 віброізолятори), кронштейн на решітному стані (листова сталь 3 мм, регулювання висоти 30 мм), корпус БКВЗ (IP54, алюміній, габарити 180×140×60 мм). Моделювання методом скінченних елементів (COSMOSWorks) підтвердило власну частоту пластини $f_1 = 2,35$ кГц (відповідає розрахунковій 2,2 кГц), максимальне переміщення в центрі при ударі 0,14 мм, еквівалентне напруження фон Мізеса 28 МПа (значно нижче границі текучості 210 МПа). Перевірка на інтерференції показала відсутність колізій із рухомими частинами комбайна (мінімальний зазор до клавіш соломотряса 85 мм).

5. Визначено повний перелік компонентів системи та оцінено трудомісткість монтажу. До складу системи входять: 5 п'єзоелектричних датчиків (3 – під соломотрясом, 2 – на очищенні), БКВЗ, кабельна мережа (екранований кабель 4×0,25 мм², загальна довжина до 20 м, 5 герметичних роз'ємів Binder 712), 4 віброізолятори АВ-20, кріпильна арматура. Час монтажу системи кваліфікованими механіками оцінено в 4–6 годин без розбирання основних вузлів комбайна.

6. Запропоновані конструктивні рішення забезпечують мінімальне втручання в штатну конструкцію комбайна. Доопрацювання зводяться до свердління 4 отворів Ø10 мм у корпусі соломотряса та 4 отворів Ø6 мм у бічних стінках кожуха очищення, прокладання додаткових кабелів у штатних кабельних каналах та підключення до бортової мережі 12 В через додатковий автомат захисту 5 А.

					14.17 - КР.014.3.000 ПЗ	Аркуш
						78
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів під час експлуатації та обслуговування зернозбиральних комбайнів

Нормативно-правова база охорони праці в сільськогосподарському виробництві

Охорона праці при експлуатації зернозбиральних комбайнів в Україні регламентується насамперед Правилами охорони праці у сільськогосподарському виробництві (НПАОП 01.0-1.02-18), затвердженими наказом Мінсоцполітики від 29.08.2018 № 1240 та чинними з 12 жовтня 2018 року. Цей нормативно-правовий акт встановлює вимоги безпеки до організації робіт, технологічних процесів, виробничого обладнання, транспортних засобів та засобів індивідуального захисту в сільськогосподарському виробництві.

Відповідно до статті 153 Кодексу законів про працю України, роботодавець зобов'язаний створити безпечні та нешкідливі умови праці, забезпечити дотримання вимог нормативно-правових актів з охорони праці. Крім того, діють Вимоги до технічного стану тракторів, самохідних шасі, самохідних сільськогосподарських, дорожньо-будівельних і меліоративних машин, затверджені постановою Кабінету Міністрів України.

					14.17 - КР.014.4.000 ПЗ						
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Бабак			РОЗДІЛ 4			Літ.	Аркуш	Аркушів	
Перевір.		Дядюра К. О.								79	10
Реценз.											
Н. Контр.											
Затверд.		Дядюра К. О.									

Класифікація небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Відповідно до Методичних рекомендацій для проведення атестації робочих місць за умовами праці, виробничі фактори поділяються на небезпечні (вплив яких за певних умов призводить до травми або раптового погіршення стану здоров'я) та шкідливі (можуть спричинити професійну патологію, зниження працездатності або порушення здоров'я потомства).

Для роботи на зернозбиральному комбайні характерні всі чотири групи факторів: фізичні, хімічні, біологічні та психофізіологічні. Роботодавець зобов'язаний довести працівнику під підпис інформацію про наявність цих факторів, можливі наслідки їх впливу на здоров'я, а також право на пільги та компенсації.

Фізичні небезпечні та шкідливі фактори

Найбільшу групу факторів під час експлуатації комбайна становлять фізичні небезпеки.

Рухомі та обертові частини молотильний барабан (частота обертання 400–550 хв⁻¹), клавіші соломотряса, різальний апарат жатки, карданні вали, пасові передачі та ланцюги. Згідно з правилами охорони праці, вузли та елементи сільськогосподарських машин, що рухаються, обертаються та можуть становити небезпеку, мають бути огорожені захисними кожухами. Однак під час технічного обслуговування, очищення або регулювання комбайна огороження знімаються, що створює ризик травмування.

Підвищений рівень вібрації – вібраційне навантаження на оператора передається через сидіння, органи керування та підлогу кабіни. Джерелами вібрації є двигун, молотильний барабан, клавішний соломотряс (частота 4–6 Гц), ходова система. Тривала дія вібрації може спричинити вібраційну хворобу з ураженням судин, нервової системи та опорно-рухового апарату.

Підвищений рівень шуму – сумарний рівень шуму в кабіні комбайна може досягати 85–95 дБА (при допустимих 80 дБА для 8-годинної роботи згідно з санітарними нормами). Основними джерелами шуму є двигун, трансмісія, молотильний апарат, вентилятор очищення та вібрація корпусу. Тривалий вплив

					14.17 - КР.014.4.000 ПЗ	Аркуш
						80
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

шуму призводить до професійної туговухості, зниження уваги та підвищеної втомлюваності.

Запиленість повітря робочої зони — під час збирання в повітря потрапляє зерновий пил, пилок, спори грибків, залишки рослинності. Концентрація пилу може значно перевищувати гранично допустимі норми (ГДК для зернового пилу становить 4 мг/м³). Зерновий пил є не тільки шкідливим для органів дихання, але й вибухонебезпечним за певних умов.

Мікрокліматичні умови – робота в кабіні комбайна в літній період характеризується високими температурами (до 35–40°C) та відносною вологістю 30–60%. За відсутності ефективної системи кондиціонування це призводить до перегріву організму, теплового удару, зниження працездатності та підвищення ризику помилкових дій.

Недостатня освітленість – під час вечірніх та нічних змін освітленість робочого поля та кабіни повинна відповідати нормам (не менше 50 лк на полі перед комбайном). Недостатнє освітлення ускладнює контроль за технологічним процесом, підвищує ризик наїзду на перешкоди та травмування.

Підвищена небезпека ураження електричним струмом – електрообладнання комбайна працює під напругою 12 В та 24 В (бортова мережа), що за звичайних умов не є небезпечним для життя. Однак під час модернізації з додаванням мікропроцесорних систем можуть використовуватися напруги до 50 В (згідно з ISO 23285:2025 для класу A2) або до 75 В для гібридних систем (клас B1). За певних умов (волога шкіра, відсутність заземлення, несправна ізоляція) навіть ці напруги можуть становити небезпеку.

Хімічні небезпечні та шкідливі фактори

Хімічні фактори при експлуатації комбайна включають:

– *Паливно-мастильні матеріали* – дизельне паливо, моторна олива, гідравлічна рідина, трансмісійна олива. Вони токсичні при вдиханні парів, потраплянні на шкіру та слизові оболонки. Особливу небезпеку становить витік гідравлічної рідини під високим тиском (до 20–25 МПа), який може спричинити важкі травми при проколюванні шкіри

					14.17 - КР.014.4.000 ПЗ	Аркуш
						81
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– *Відпрацьовані гази двигуна* – містять оксид вуглецю (чадний газ), оксиди азоту, сажу. При роботі в приміщенні або за відсутності герметизації кабіни можливе отруєння чадним газом.

– *Засоби захисту рослин* – залишки пестицидів на рослинних рештках можуть потрапляти в кабіну через систему вентиляції.

Біологічні фактори

Під час збирання врожаю комбайнер контактує з рослинними залишками, зерном, пилом, суперечками грибків. Це може спричинити алергічні реакції (риніти, кон'юнктивіти, бронхоспазми), захворювання легень (екзогенний алергічний альвеоліт — «легке фермера»), а також шкірні захворювання.

Психофізіологічні фактори

- Робота комбайнера характеризується високою напруженістю праці:
- Інтенсивне спостереження за процесом збирання (подача хлібної маси, рівень втрат, стан техніки) вимагає постійної уваги та концентрації.
- Монотонність рухів при тривалій роботі (зміна триває до 12–14 годин у період жнив) призводить до зниження працездатності.
- Відповідальність за збереження врожаю та справність дорогої техніки створює емоційне навантаження.
- Дефіцит часу через стислі агротехнічні терміни збирання (оптимальний період для зернових становить 7–10 днів) підвищує стрес.

Небезпечні фактори при технічному обслуговуванні

Проведення технічного обслуговування, регулювання та ремонту комбайна пов'язане з додатковими небезпеками:

- Робота під піднятим корпусом або жаткою потребує застосування механічних упорів, оскільки відмова гідравліки може призвести до раптового опускання.

					14.17 - КР.014.4.000 ПЗ	Аркуш
						82
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– Налагодження механізмів на ходу (наприклад, регулювання молотильного зазору під час роботи) створює ризик контакту з рухомими частинами.

– Очищення комбайна від соломи та полови (особливо обдування стисненим повітрям) підвищує запиленість та ризик травмування очей.

– Використання переносних електроінструментів (дрилі, «болгарки») потребує контролю за ізоляцією та заземленням.

– Заходи щодо мінімізації впливу небезпечних та шкідливих факторів

Згідно з чинним законодавством, роботодавець зобов'язаний усунути шкідливі та небезпечні виробничі фактори або мінімізувати їхній вплив до гранично допустимих значень. До основних заходів належать:

Колективні засоби захисту:

– Герметизація кабіни з системою кондиціонування та фільтрації повітря (зниження запиленості та загазованості).

– Звуко- та віброізоляція кабіни (обивка з вібропоглинальних матеріалів, пружне кріплення сидіння).

– Огородження рухомих частин з блокуваннями, які автоматично вимикають механізми при відкритті кожухів.

– Системи аварійної зупинки (стоп-кран) в кабіні та зовні.

– Відповідне освітлення робочих зон (не менше 50 лк на полі).

Індивідуальні засоби захисту:

– Протишумні навушники або вкладиші при роботі в умовах підвищеного шуму.

– Респіратори типу FFP2/FFP3 (при виконанні робіт, пов'язаних з утворенням пилу).

– Захисні окуляри (при обдуванні комбайна стисненим повітрям).

– Рукавиці та спецвзуття.

					14.17 - КР.014.4.000 ПЗ	Аркуш
						83
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Організаційні заходи:

- Проведення попередніх (при прийнятті на роботу) та періодичних (щорічних) медичних оглядів.
- Дотримання регламентованих перерв у роботі (через кожні 2 години — 10-хвилинна перерва).
- Заборона доступу сторонніх осіб до зони роботи комбайна та до місць технічного обслуговування.
- Проведення інструктажів з охорони праці (вступний, первинний, повторний, позаплановий, цільовий).

4.2. Заходи безпеки при монтажі та налаштуванні мікропроцесорних систем на мобільній сільськогосподарській техніці

Міжнародні стандарти безпеки для мікропроцесорних систем сільгосптехніки

Модернізація зернозбирального комбайна системою автоматичного контролю втрат зерна передбачає встановлення додаткових мікропроцесорних компонентів: датчиків, електронного блоку керування, дисплея, кабельної мережі. Безпека таких систем регламентується низкою міжнародних та національних стандартів.

ISO 25119:2024 (Tractors and machinery for agriculture and forestry — Safety-related parts of control systems) — встановлює загальні принципи проєктування та розроблення частин систем керування, що стосуються безпеки (SRP/CS) для тракторів, самохідних машин та навісного обладнання. Стандарт охоплює функційну безпеку електричних/електронних/програмованих електронних систем (E/E/PES), включаючи захист від небезпечних наслідків збоїв програмного забезпечення.

ISO 23285:2025 (Agricultural machinery, tractors, and earth-moving machinery — Safety of electrical and electronic components and systems operating at 32 V to 75 V DC and 21 V to 50 V AC) — новий стандарт, опублікований у лютому 2025

					14.17 - КР.014.4.000 ПЗ	Аркуш
						84
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

року. Він визначає вимоги до захисту операторів і сторонніх осіб від ураження електричним струмом та пожеж, спричинених електрикою, для систем з напругою від 32 В до 75 В постійного струму та 21–50 В змінного струму. Стандарт встановлює технічні заходи з усунення або зменшення ризиків під час введення в експлуатацію, роботи та технічного обслуговування.

ISO 12100 — загальний стандарт з безпеки машин (механічних), на який посилається ISO 25119.

Загальні вимоги безпеки при монтажі мікропроцесорних систем

При встановленні системи моніторингу втрат зерна на комбайн необхідно дотримуватися наступних правил безпеки:

Організаційні заходи:

- Монтаж повинні виконувати лише особи, які пройшли відповідне навчання та мають допуск до робіт з технічним обслуговуванням сільськогосподарської техніки (не нижче кваліфікації «електромеханік сільськогосподарського виробництва»).

- До початку робіт комбайн повинен бути зупинений, двигун вимкнений, ключ запалювання вилучений. На органи керування пуском двигуна вивішується заборонний знак «Не вмикати — працюють люди!».

- Роботи проводяться на спеціально обладнаному майданчику з твердим покриттям за умов достатнього освітлення (не менше 150 лк на робочому місці).

- При роботі з електрообладнанням забороняється користуватися несправним інструментом, з пошкодженою ізоляцією рукояток.

Технічні заходи:

- Перед початком монтажу необхідно від'єднати акумуляторну батарею (спочатку мінусову клему) для запобігання короткому замиканню та випадковому пуску.

- При роботі з електричними компонентами (контролер, датчики) слід використовувати заземлений антистатичний браслет для захисту мікросхем від статичної електрики (особливо в суху погоду).

					14.17 - КР.014.4.000 ПЗ	Аркуш
						85
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– Прокладання додаткових кабелів повинно виконуватися з урахуванням вимог до електромагнітної сумісності (сигнальні кабелі прокладаються окремо від силових на відстані не менше 200 мм, або в екранованих оболонках).

– Кабелі кріпляться до нерухомих частин комбайна пластиковими стяжками або металевими хомутами з кроком не більше 300 мм. У місцях можливого механічного пошкодження кабелі захищаються гофрованими трубами або металевими рукавами.

– Всі з'єднання повинні бути виконані герметичними роз'ємами для захисту від вологи та пилу (ступінь захисту не нижче IP67 для датчиків, встановлених у зоні очищення).

Вимоги безпеки до електрообладнання модернізованого комбайна

Додаткове електрообладнання, що встановлюється на комбайн, повинно відповідати таким вимогам:

Захист від короткого замикання та перевантаження:

– Кожна нова електрична лінія (датчики, БКВЗ, додатковий дисплей) повинна бути захищена окремим запобіжником або автоматичним вимикачем, встановленим безпосередньо біля місця підключення до акумулятора.

– Номінал запобіжника вибирається виходячи з максимального струму споживання (із запасом 20–30%). Для БКВЗ рекомендований запобіжник на 5 А.

– Живлячі кабелі повинні мати перетин, достатній для пропускання робочого струму без перегріву. Для ліній зі струмом до 5 А рекомендується перетин не менше 0,75 мм² (для мідного кабелю).

Електромагнітна сумісність:

– Сигнальні кабелі від датчиків до БКВЗ повинні бути екранованими (типу LiYCY 4×0,25 мм²) з заземленням екрану тільки з боку БКВЗ (для запобігання утворенню «земляних петель»).

– БКВЗ повинен бути встановлений в металевий корпус, з'єднаний з масою комбайна (заземлення) для відведення завад.

					14.17 - КР.014.4.000 ПЗ	Аркуш
						86
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– При прокладанні сигнальних кабелів поблизу джерел сильних електромагнітних завад (генератор, запалювання, інвертор) необхідно дотримуватися відстані не менше 300 мм.

Захист від вологи та агресивних середовищ:

– Для зовнішніх датчиків (під соломотрясом, на решітному стані) ступінь захисту повинен бути не нижче IP67 (повний захист від пилу та короткочасне занурення у воду).

– Роз'єми повинні бути герметичного типу (наприклад, Binder 712), з ущільнювальними кільцями.

– Забороняється встановлювати електронні блоки в місцях можливого скупчення вологи, прямого потрапляння води при мийці або в зонах з агресивним хімічним середовищем (біля акумулятора).

Вимоги до функційної безпеки системи контролю втрат

Відповідно до вимог ISO 25119, система моніторингу втрат зерна повинна забезпечувати визначений рівень функційної безпеки (Agricultural Performance Level, AgPL) залежно від тяжкості можливих наслідків відмови. Для системи моніторингу втрат:

– Відмова, що призводить до втрати точних даних — наслідки: збільшення втрат зерна через неправильне регулювання. Тяжкість: низька (фінансові втрати). Рекомендований AgPL: a.

– Відмова, що призводить до некоректного керування швидкістю — наслідки: можливе зіткнення або перевантаження. Тяжкість: середня. Рекомендований AgPL: b.

– Відмова, що створює електричну небезпеку (коротке замикання, ураження струмом) — тяжкість: висока (травмування). Рекомендований AgPL: c.

Для досягнення AgPL b–c необхідно реалізувати:

– Моніторинг справності датчиків (тестові імпульси, перевірка діапазону сигналу).

					14.17 - КР.014.4.000 ПЗ	Аркуш
						87
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– Діагностику зв'язку по CAN-шині (watchdog таймер, контроль цілісності повідомлень).

– Вхідне голосування датчиків (використання трьох датчиків замість одного для мажоритарного ухвалення рішення).

Безпека під час налагодження та тестування системи

Після завершення монтажу проводиться налагодження та тестування системи. Заходи безпеки на цьому етапі:

– Під час подачі напруги на систему комбайн повинен бути надійно загальмований стоянковим гальмом, колеса зафіксовані упорами.

– Перше включення проводиться за відсутності сторонніх осіб у безпосередній близькості від комбайна.

– При роботі з відкритими кожухами (наприклад, при перевірці спрацювання датчиків під соломотрясом) необхідно зафіксувати підняті частини механічними упорами.

– Забороняється вносити зміни в прошивку контролера під час роботи комбайна (на ходу). Оновлення програмного забезпечення виконується лише на стоянці при вимкненому двигуні.

– При використанні ноутбука для налагодження (підключення через USB до БКВЗ) забороняється працювати з комп'ютером під час руху комбайна.

					14.17 - КР.014.4.000 ПЗ	Аркуш
						88
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

У четвертому розділі кваліфікаційної роботи виконано аналіз умов праці при експлуатації зернозбирального комбайна, розроблено заходи безпеки при монтажі та налаштуванні мікропроцесорних систем, а також розглянуто питання пожежної безпеки при збиранні врожаю.

1. Виявлено основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори, що впливають на комбайнера та обслуговуючий персонал. До них належать: рухомі та обертові частини, підвищені рівні вібрації (до 5g) та шуму (85–95 дБА), запиленість робочої зони (перевищення ГДК до 5–10 разів), несприятливі мікрокліматичні умови (температура до 40°C), а також хімічні (паливо, мастила, відпрацьовані гази) та біологічні фактори (алергени). Робота характеризується високою психофізіологічною напруженістю через тривалість зміни (12–14 годин) та високу відповідальність.

2. Встановлено нормативно-правові вимоги до охорони праці згідно з НПАОП 01.0-1.02-18 (Правила охорони праці у сільськогосподарському виробництві), якими регламентуються вимоги до безпеки машин, організації робіт та засобів індивідуального захисту.

3. Розроблено заходи безпеки при монтажі та налаштуванні мікропроцесорних систем з урахуванням вимог міжнародних стандартів ISO 25119 (функційна безпека систем керування) та ISO 23285 (електробезпека для систем напругою до 75 В). Визначено:

- організаційні заходи (допуск кваліфікованого персоналу, відключення акумулятора, антистатичний захист);
- технічні вимоги (захисне заземлення, захист від КЗ та перевантаження, герметичні роз'єми IP67);
- вимоги електромагнітної сумісності (екранування сигнальних кабелів, заземлення екранів);
- рівні функційної безпеки AgPL а–с (залежно від наслідків відмови системи).

					14.17 - КР.014.4.000 ПЗ	Аркуш
						89
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. Проаналізовано основні причини пожеж на комбайнах — перегрів двигуна та вихлопної системи (600–900°C), накопичення легкозаймистих матеріалів (солома, зерно, пил), витоки палива та мастил, короткі замикання в електрообладнанні. Пожежа на комбайні без належного захисту може знищити машину за 5–10 хвилин.

5. Розроблено рекомендації щодо оснащення комбайна первинними засобами пожежогасіння — два порошкові вогнегасники місткістю не менше 5 л кожен, дві штикові лопати, два відра, покривало з негорючого матеріалу. Виконано розрахунок необхідної кількості вогнегасного порошку для автоматичної системи: для комбайна класу 8–10 кг/с рекомендовано 8–10 кг порошку та 8–10 л піни (dual agent). Для моторного відсіку об'ємом 2,0–2,5 м³ коефіцієнт необхідної концентрації становить $k_{vol} \approx 0.8 \dots 1.2$ кг/м³.

6. Наведено алгоритм дій комбайнера при пожежі: зупинка та вимкнення двигуна, оповіщення, застосування первинних засобів (при невеликому займанні), виклик ДСНС (101) при неможливості ліквідації, безпечна евакуація. За наявності автоматичної системи пожежогасіння — надання їй можливості спрацювати без втручання протягом 30–60 секунд.

Таким чином, аналіз небезпечних і шкідливих факторів, розробка заходів безпеки та вимог пожежної безпеки, виконані в розділі 4, є необхідною складовою кваліфікаційної роботи, що забезпечує безпечну експлуатацію модернізованого зернозбирального комбайна з системою автоматичного контролю втрат зерна.

					14.17 - КР.014.4.000 ПЗ	Аркуш
						90
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 5

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ МОДЕРНІЗАЦІЇ

5.1 Розрахунок капітальних витрат на придбання, виготовлення компонентів та монтаж системи контролю втрат

Склад та вартість основних компонентів системи

Відповідно до конструкторських розроблень, виконаних у розділі 3, модернізована система автоматичного контролю втрат зерна складається з наступних основних компонентів: п'єзоелектричних датчиків втрат зерна (5 шт.), блоку збору та первинної обробки сигналів (БКВЗ), екранованих кабелів із герметичними роз'ємами, віброізоляторів, елементів кріплення та захисних кожухів.

Вартість основних компонентів системи визначено на основі даних українських постачальників запчастин для сільськогосподарської техніки та розрахунків вартості виготовлення оригінальних вузлів (таблиця 5.1).

Для зручності та наочності сумарну вартість матеріалів та комплектуючих приймаємо рівною 16 000 грн.

Розрахунок витрат на виготовлення та монтаж системи

До капітальних витрат належать також витрати на виготовлення нестандартних вузлів (кронштейни кріплення датчиків, захисні кожухи, рамні конструкції) та оплата праці фахівців з монтажу та налагодження системи.

Витрати на виготовлення металевих конструкцій (кронштейни для кріплення датчиків під соломотрясом та на решітному стані, захисні екрани) розраховуються за нормами часу на слюсарно-складальні та зварювальні роботи (рисунок 5.2).

					14.17 - КР.014.5.000 ПЗ									
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата										
Розроб.		Бабак			РОЗДІЛ 5				Літ.		Аркуш		Аркушів	
Перевір.		Дядюра К. О.									91		8	
Реценз.														
Н. Контр.														
Затверд.		Дядюра К. О.												

Таблиця 5.1 – Розрахунок вартості основних компонентів системи контролю втрат зерна

№ з/п	Найменування компонента	Кількість, шт.	Ціна за одиницю, грн	Сума, грн
1	Датчик втрат зерна п'єзоелектричний ДПЗП-1 (аналог)	5	775	3 875
2	П'єзоелектричний перетворювач PZT-5H (20×20×0,2 мм)	5	450	2 250
3	Мікроконтролер STM32F407VET6 з платою (BLUEPILL)	1	1 200	1 200
4	Корпус БКВЗ металевий IP54 (160×120×50 мм)	1	850	850
5	Джерело живлення (DC-DC перетворювачі та LDO)	комплект	650	650
6	CAN-трансівер SN65HVD230 із гальванічною розв'язкою	1	320	320
7	Друкована плата (виготовлення та монтаж)	1	1 500	1 500
8	Екранований кабель LiYCY 4×0,25 мм ² (до 20 м)	20 м	25	500
9	Роз'єми герметичні Binder 712 (4-контактні)	6	180	1 080
10	Віброізолятори гумові АВ-20	8	55	440
11	Матеріали для виготовлення кронштейнів та кожухів	комплект	2 500	2 500
12	Інші матеріали (кріплення, прищіп, монтажні проводи)	комплект	800	800
Разом вартість матеріалів та комплектуючих				15 965

Загальна трудомісткість монтажних робіт, включаючи встановлення датчиків, прокладання кабельних ліній, підключення БКВЗ та налагодження системи, становить близько 6 людино-годин. Розрахунок витрат на оплату праці виконано з урахуванням середньої годинної тарифної ставки електромеханіка сільськогосподарського виробництва, яка станом на 2026 рік становить 110–150 грн/год залежно від кваліфікації (таблиця 5.3).

Таблиця 5.2 – Розрахунок витрат на виготовлення вузлів кріплення

№ з/п	Найменування роботи	Норма часу, люд.-год	Кількість	Розцінка, грн/год	Сума, грн
1	Заготівельні роботи (різка, гнуття)	2,0	1	120	240
2	Зварювальні роботи (рама під соломотряс)	1,5	1	150	225
3	Токарні роботи (виготовлення віброопор)	1,0	1	150	150
4	Слюсарна обробка деталей	3,0	1	100	300
Разом витрати на виготовлення					915

Таблиця 5.3 – Розрахунок витрат на монтаж та налагодження системи

№ з/п	Найменування роботи	Трудомісткість, люд.-год	Розцінка, грн/год	Сума, грн
1	Демонтаж кожухів, підготовка місць встановлення	1,0	120	120
2	Встановлення датчиків та кронштейнів	1,5	130	195
3	Прокладання та кріплення кабелів	1,0	130	130
4	Підключення БКВЗ та монтаж у кабіні	1,0	140	140
5	Налагодження та калібрування системи	1,5	150	225
Разом витрати на монтаж та налагодження				810

Зведений розрахунок капітальних витрат

Зведений розрахунок капітальних витрат на модернізацію комбайна системою автоматичного контролю втрат зерна наведено в таблиці 5.4.

Сумарні капітальні витрати на модернізацію одного зернозбирального комбайна за запропонованою системою становлять 18 500 грн. Для порівняння, вартість покупної системи Farmwave з однією камерою становить 16 000 (близько 656000 грн за курсом 41 грн/), а система з двома камерами – 18 000

					14.17 - КР.014.5.000 ПЗ	Аркуш
						93
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

\$ (близько 738 000 грн). Таким чином, розроблена система є значно дешевшою (у ~35 разів) при забезпеченні необхідної функціональності контролю втрат.

Таблиця 5.4 – Зведені капітальні витрати

№ з/п	Стаття витрат	Сума, грн
1	Вартість матеріалів та комплектуючих	15 965
2	Витрати на виготовлення вузлів кріплення	915
3	Витрати на монтаж та налагодження	810
4	Транспортно-заготівельні витрати (5%)	799
Разом капітальні витрати (К)		18 489

5.2 Визначення річної економії зерна за рахунок оперативного оптимізації режимів роботи комбайна

Вихідні дані для розрахунку ефективності

Для визначення річної економії зерна необхідно використовувати усереднені показники, що характеризують виробничі умови типового сільськогосподарського підприємства України:

- Середня врожайність зернових – 5,08 т/га (середня врожайність зернових в Україні у 2025 році). Зважаючи на значну варіацію врожайності за регіонами (від 3,1 т/га до 4,02 т/га для пшениці у 2025 році), для розрахунків приймаємо $Y = 5,0$ т/га.

- Площа збирання одним комбайном за сезон – типовий зернозбиральний комбайн в Україні завантажений у період жнив (в середньому 20–25 робочих днів) на площі $S = 500$ га (згідно з наявними даними, за 10 днів жнив комбайн може зібрати врожай із площі 350–430 га).

- Валовий збір зерна одним комбайном:

$$Q = S \cdot Y = 500 \cdot 5,0 = 2500 \text{ т/сезон.}$$

- Закупівельна ціна пшениці – за даними 2025 року, ціна на пшеницю 3 класу становила близько 10 000 грн/т. Для розрахунків приймаємо $C = 10\,000$ грн/т (≈ 230 /тзакурсом 43грн/).

					14.17 - КР.014.5.000 ПЗ	Аркуш
						94
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– Втрати зерна без системи контролю – дослідженнями встановлено, що фактичні втрати зерна в типових господарствах часто перевищують допустимий рівень (1,0–1,5%) і можуть сягати 3–5% від валового збору. У першому наближенні приймаємо $L_1 = 3,0\%$.

– Втрати зерна з використанням системи контролю – після впровадження системи контролю втрат стає можливим підтримання оптимальних режимів роботи комбайна. Дослідження на комбайні Lexion 560 показали, що оптимальні показники втрат (дозволені датчиком) становили 1,25%. Приймаємо $L_2 = 1,25\%$.

Розрахунок річної економії зерна

Зменшення втрат зерна внаслідок впровадження системи контролю становить:

$$\Delta L = L_1 - L_2 = 3,0\% - 1,25\% = 1,75\%.$$

Обсяг збереженого зерна:

$$Q_{зб} = Q \cdot \Delta L = 2500 \cdot 0,0175 = 43,75 \text{ т/сезон.}$$

Економічний ефект від збереженого зерна:

$$E_{\text{зерно}} = Q_{зб} \cdot Ц = 43,75 \cdot 10000 = 437\,500 \text{ грн/сезон.}$$

Додаткові складові економічного ефекту.

Крім прямої економії від збереженого зерна, система автоматичного контролю втрат забезпечує додаткові переваги, які можуть бути враховані у другому наближенні:

1. Підвищення продуктивності комбайна. Експериментальні дослідження показали, що продуктивність комбайна по зібраних гектарах за рахунок оптимальних показників дозволених датчиком втрат підвищується на 26%, а по зібраній масі врожаю – на 36%. Підвищення швидкості руху комбайна з 6,22 км/год до 7,78 км/год дозволяє збільшити намот за зміну на 13 т/год. Для господарства з обмеженими агростроками жнив це зменшує ризик втрат від осипання перезрілого зерна.

2. Економія палива. За рахунок підвищеного завантаження двигуна питома витрата палива зменшується на 0,796 л/т. При річному намоті 2500 т економія палива становитиме:

					14.17 - КР.014.5.000 ПЗ	Аркуш
						95
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\Delta V_{\text{палив}} = 2500 \cdot 0,796 = 1990 \text{ л/сезон.}$$

При вартості дизельного палива ~55 грн/л економія складе:

$$E_{\text{палив}} = 1990 \cdot 55 = 109\,450 \text{ грн/сезон.}$$

Сумарний річний економічний ефект з урахуванням усіх складових:

$$E_{\text{річ}} = E_{\text{зерно}} + E_{\text{палив}} = 437\,500 + 109\,450 = 546\,950 \text{ грн/сезон.}$$

Результати розрахунку річної економії зведено в таблицю 5.5.

Таблиця 5.5 – Розрахунок річної економії від впровадження системи контролю втрат зерна

№ з/п	Показник	Позначення	Значення
1	Площа збирання одним комбайном, га	S	500
2	Урожайність зернових, т/га	Y	5,0
3	Валовий збір зерна, т	Q	2500
4	Втрати зерна без системи контролю, %	L ₁	3,0
5	Втрати зерна з системою контролю, %	L ₂	1,25
6	Зменшення втрат, %	ΔL	1,75
7	Обсяг збереженого зерна, т	Q {зб}	43,75
8	Ціна зерна, грн/т	Ц	10 000
9	Пряма економія від зерна, грн	E _{зерно}	437 500
10	Економія палива, л	ΔV _{палив}	1990
11	Вартість палива, грн/л	Ц _{палив}	55
12	Економія палива, грн	E _{палив}	109 450
13	Сумарна річна економія, грн	E _{річ}	546 950

5.3 Оцінка показників економічної ефективності та терміну окупності витрат на модернізацію

Методологія оцінки економічної ефективності

Для оцінки ефективності капіталовкладень у модернізацію комбайна використовуються основні показники інвестиційного аналізу: чистий дисконтований дохід (ЧДД, NPV) та термін окупності. Розрахунки виконано на основі реальних ринкових показників 2025–2026 років.

При визначенні коефіцієнта дисконтування враховується облікова ставка Національного банку України, яка з червня 2025 року становить 15,5%. Крім того, доцільно враховувати премію за ризик для сільськогосподарського

					14.17 - КР.014.5.000 ПЗ	Аркуш
						96
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

виробництва на рівні 4,5%. Таким чином, загальна ставка дисконту для розрахунків приймається на рівні $r = 20\%$.

Розрахунок чистого дисконтованого доходу (NPV) (таблиця 5.6)

Розрахунок виконується за формулою:

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} - K, \quad (5.1)$$

де CF_t – чистий грошовий потік у році t (річна економія), K – капітальні витрати, r – ставка дисконтування (20%), n – термін експлуатації системи (приймаємо 5 років).

Таблиця 5.6 – Розрахунок дисконтованих грошових потоків

Рік	Річний грошовий потік, CF_t , грн	Коефіцієнт дисконтування $(1+r)^{-t}$	Дисконтований грошовий потік, грн
0	-18 500 (інвестиції)	1,000	-18 500
1	546 950	0,83333	455 792
2	546 950	0,69444	379 743
3	546 950	0,57870	316 563
4	546 950	0,48225	263 768
5	546 950	0,40188	219 803

$$NPV = -18\,500 + (455\,792 + 379\,743 + 316\,563 + 263\,768 + 219\,803) = 1\,637\,169 \text{ грн.}$$

Отримане значення $NPV > 0$ свідчить про високу економічну доцільність модернізації.

Розрахунок терміну окупності.

Простий (недисконтований) термін окупності:

$$PP = \frac{K}{E_{\text{річ}}} = \frac{18\,500}{546\,950} \approx 0,034 \text{ року} \approx 12 \text{ днів.}$$

Дисконтований термін окупності (DPP) визначається як період, за який сума дисконтованих грошових потоків від операційної діяльності досягає величини початкових інвестицій.

Накопичений дисконтований грошовий потік наростаючим підсумком:

За 1 місяць: $546\,950/12 \approx 45\,579$ грн (дисконтований $\sim 37\,982$ грн) – умовно, за місяць сума дисконтованого потоку вже значно перевищує інвестиції.

Оскільки капітальні витрати становлять 18 500 грн, а щомісячний дисконтований грошовий потік (при сезонному характері надходжень, але за умови рівномірного розподілу) орієнтовно перевищує 45 000 грн (без дисконтування), можна стверджувати, що дисконтований термін окупності становить менше 1 місяця.

Розрахунок внутрішньої норми доходності (IRR)

Внутрішня норма доходності — це ставка дисконту r_{IRR} , за якої $NPV = 0$. Для даного проекту:

$$-18\,500 + \frac{546\,950}{r_{IRR}} \cdot \left(1 - \frac{1}{(1+r_{IRR})^5}\right) = 0.$$

При річному грошовому потоці 546 950 грн та інвестиціях 18 500 грн, r_{IRR} становить декілька сотень відсотків, що значно перевищує будь-які ринкові ставки.

Зведені показники економічної ефективності.

Основні показники економічної ефективності модернізації наведено в таблиці 5.7.

Таблиця 5.7 – Основні показники економічної ефективності

№ з/п	Показник	Позначення	Значення
1	Капітальні витрати, грн	K	18 500
2	Річна економія, грн	E	546 950
3	Коефіцієнт економічної ефективності	E/K	29,56
4	Простий термін окупності, дні	PP	~ 12
5	Дисконтований термін окупності, міс.	DPP	< 1
6	Чистий дисконтований дохід (NPV), грн	NPV	1 637 169
7	Внутрішня норма доходності	IRR	$\sim 2950\%$

Висновки

На основі проведеного техніко-економічного обґрунтування модернізації зернозбирального комбайна системою автоматичного контролю втрат зерна можна зробити такі висновки:

1. Капітальні витрати на модернізацію одного комбайна становлять 18 500 грн, що включає вартість матеріалів та комплектуючих (16 000 грн), виготовлення вузлів кріплення (915 грн), монтаж та налагодження (810 грн) та транспортно-заготівельні витрати (799 грн). Розроблена система є значно дешевшою (у ~35 разів) порівняно з аналогічними покупними системами (Farmwave – 16 000–18 000 \$).

2. Річна економія від впровадження системи становить близько 437 500 грн за рахунок збереження 43,75 т зерна (зменшення втрат з 3,0% до 1,25%). Додаткова економія палива (1990 л/рік) забезпечує додаткові 109 450 грн, що збільшує сумарну річну економію до 546 950 грн.

3. Коефіцієнт економічної ефективності становить 29,56, що значно перевищує нормативні показники для сільськогосподарської техніки. Простий термін окупності капітальних витрат дорівнює 12 дням, що практично означає окупність протягом перших робочих днів жнив. Дисконтований термін окупності (з урахуванням ставки дисконту 20%) становить менше одного місяця.

4. Чистий дисконтований дохід (NPV) за 5-річний період експлуатації системи становить 1 637 169 грн, що підтверджує високу економічну доцільність модернізації. Внутрішня норма доходності (IRR) перевищує 2900%, що свідчить про виняткову ефективність проекту.

5. Отримані результати розрахунків свідчать, що модернізація комбайна запропонованою системою є економічно виправданим заходом, який забезпечує швидке повернення інвестицій та значний фінансовий ефект для сільськогосподарського підприємства.

					14.17 - КР.014.5.000 ПЗ	Аркуш
						99
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі виконано теоретичне та інженерне обґрунтування модернізації зернозбирального комбайна системою автоматичного контролю втрат зерна. На основі проведених досліджень, розрахунків та конструкторських розроблень сформульовано такі основні висновки:

1. Аналіз сучасного стану питання (розділ 1) показав, що технологічні втрати зерна при збиранні в Україні сягають 16–18% від валового збору, причому основними джерелами є процеси обмолоту та сепарації. Огляд існуючих систем моніторингу виявив, що п'єзоелектричні датчики (похибка 3–8%) є найпоширенішим компромісним рішенням, однак вони мають суттєві недоліки: чутливість до вібрацій, «фантомні» показання від домішок та нездатність виявляти зерно, захоплене соломомою. Оптичні системи (Yield EyeQ, Farmwave) забезпечують пряме виявлення втрат з точністю до 91,6%, але мають високу вартість (€9 000–12 000). Стандарт ISO 11783 (ISOBUS) є необхідною технологічною основою для інтеграції системи в кіберфізичний комплекс комбайна.

2. Теоретичне обґрунтування параметрів системи (розділ 2) базується на розроблених математичних моделях. Модель динамічної взаємодії зернівки з чутливою пластиною (теорія Герца, рівняння згинальних коливань Кірхгофа, прямий п'єзоелектричний ефект) дала змогу встановити кількісні співвідношення: для пшениці ($m_g = 40$ мг, $v_n = 10$ м/с) максимальна контактна сила $F_{\max} \approx 1,1$ Н, тривалість імпульсу $\tau_c \approx 30$ мкс, вихідна напруга 0,5 ... 2 В.

					14.17 - КР.014.0.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ВИСНОВКИ	Літ.	Аркуш	Аркушів
Розроб.	Бабак						100	3
Перевір.	Дядюра К. О.							
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.	Дядюра К. О.							

3. Встановлено спектральні діапазони: корисний сигнал – 1...5 кГц, вібраційні завади – <500 Гц, що дозволяє застосувати адаптивну LMS-фільтрацію з придушенням завад 20...30 дБ. Розроблено математичну модель адаптивного керування швидкістю комбайна (регулятор Сміта з RLS-ідентифікацією), яка забезпечує підвищення середньої швидкості на 10–15% при дотриманні допустимого рівня втрат ($L_{max} = 2\%$).

4. Інженерний розрахунок та проектування (розділ 3) визначили оптимальну конфігурацію системи: три датчики під соломотрясом та два на решітному стані. Розроблено конструкції вузлів кріплення з віброізоляцією (власна частота 6,4 Гц, коефіцієнт передачі вібрації 0,03...0,5). Розраховано параметри електронного блоку БКВЗ (підсилення $K_u = 50$, смуга 0,5...5 кГц, частота дискретизації 20 кГц, розрядність АЦП 12 біт, споживана потужність ~1 Вт, корпус IP54). Розроблено функціональну та електричну схеми інтеграції в мережу ISOBUS (PGN 0xFE00, протокол Address Claiming, CAN-трансівер з гальванічною розв'язкою). Виконано 3D-моделювання в SolidWorks: чутлива пластина (діаметр 60 мм, товщина 0,6 мм, нержавіюча сталь) має власну частоту 2,35 кГц та напруження 28 МПа (запас міцності ~7,5). Час монтажу системи оцінено в 4–6 годин.

5. Охорона праці та безпека (розділ 4) включають аналіз небезпечних факторів: вібрація (до 5g), шум (85–95 дБА), запиленість (перевищення ГДК до 5–10 разів), температура до 40°C. Визначено заходи безпеки при монтажі мікропроцесорних систем згідно з ISO 25119 (функційна безпека, AgPL b–c) та ISO 23285 (електробезпека до 75 В). Розроблено рекомендації з пожежної безпеки: оснащення комбайна двома порошковими вогнегасниками (по 5 л), автоматичною системою гасіння з розрахунковою кількістю порошку 8–12 кг (dual agent). Наведено алгоритм дій оператора при пожежі.

6. Техніко-економічне обґрунтування (розділ 5) показало, що капітальні витрати на модернізацію одного комбайна становлять 18 500 грн. Річна економія за рахунок зменшення втрат зерна (з 3,0% до 1,25%) дорівнює 437 500 грн (збереження 43,75 т зерна), а з урахуванням економії палива (1990 л/рік, 109

					14.17 - КР.014.0.000 ПЗ	Аркуш
						101
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

450 грн) – 546 950 грн. Коефіцієнт економічної ефективності – 29,56, простий термін окупності – 12 днів, чистий дисконтований дохід за 5 років (ставка дисконту 20%) – 1 637 169 грн. Внутрішня норма доходності перевищує 2900%, що підтверджує високу ефективність проекту.

7. Наукова новизна роботи полягає в розробленій математичній моделі динамічної взаємодії зернівки з чутливою пластиною п'єзоелектричного датчика з урахуванням частотного розділення корисного сигналу та вібраційних завад, а також в обґрунтуванні алгоритмів адаптивної фільтрації (LMS) та предиктивного керування швидкістю (регулятор Сміта з RLS-ідентифікацією) для мінімізації втрат зерна.

8. Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що запропонована система має низьку вартість (у ~35 разів дешевша за аналоги), проста в монтажі (4–6 годин на один комбайн), забезпечує швидку окупність (менше одного збирального сезону) та може бути впроваджена на комбайнах різних марок (КЗС-9-1 «Славутич», John Deere S600/S700, CLAAS Lexion, New Holland CX) з мінімальними конструктивними доопрацюваннями.

9. Рекомендації для сільськогосподарських підприємств: впровадження розробленої системи на всіх зернозбиральних комбайнах господарства дозволить зменшити втрати зерна на 1,5–2,0%, підвищити продуктивність збиральної кампанії на 10–15% та забезпечити додатковий прибуток до 500 000 грн на один комбайн за сезон. Перспективним напрямом подальших досліджень є інтеграція системи з оптичними камерами комп'ютерного зору для підвищення точності розпізнавання втрат, а також використання технологій машинного навчання для прогнозування оптимальних режимів обмолоту.

					14.17 - КР.014.0.000 ПЗ	Аркуш
						102
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ISO 11783-1:2017 Tractors and machinery for agriculture and forestry – Serial control and communications data network – Part 1: General standard for mobile data communication. – Geneva : International Organization for Standardization, 2017. – 35 p.

2. НПАОП 01.0-1.02-18 Правила охорони праці у сільськогосподарському виробництві : затв. наказом М-ва соц. політики України від 29.08.2018 № 1240. – Київ : Мінсоцполітики, 2018. – 83 с.

3. Войтюк Д. Г. Сільськогосподарські машини : підручник / Д. Г. Войтюк, Л. В. Аніскевич, В. В. Іщенко та ін. ; за ред. Д. Г. Войтюка. – Київ : Агроосвіта, 2015. – 679 с.

4. Роговський І. Л. Аналіз втрат зернового збіжжя класичним молотильно-сепарувальним пристроєм зернозбирального комбайна / І. Л. Роговський // Наукові доповіді НУБіП України. – 2021. – № 4 (92). – Режим доступу: <https://scireports.com.ua/en/article/download/analiz-vtrat-zernovogo-zbizhzhya-klasichnim-molotilno-separuvalnim-pristroyem-zernozbiralnogo-kombay>.

5. Dong J. Research Status and Trend of Grain Loss Monitoring Sensor Technology / J. Dong, S. Zhao, A. Zhang et al. // INMATEH — Agricultural Engineering. — 2025. — Vol. 77, No. 3. — P. 238–250.

6. Design and test of real-time monitoring system for maize entrainment loss based on piezoelectric signal classification / X. Wang, Y. Zhang, L. Sun et al. // Measurement. — 2025. — Vol. 242, Part C. — Art. 116050..

7. Xu J. A PVDF Sensor for Monitoring Grain Loss in Combine Harvester / J. Xu, Y. Li // Computer and Computing Technologies in Agriculture IV (CCTA 2010). – Berlin, Heidelberg : Springer, 2010. – P. 712–719.

					14.17 - КР.014.0.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ			
Розроб.	Бабак							
Перевір.	Дядюра К. О.							
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.	Дядюра К. О.							
					Літ.	Аркуш	Аркушів	
						103	2	

8. Experimental Verification and Analysis of Vibration Damping Structure of Piezoelectric Ceramic Grain Loss Sensor / Y. Zhang, T. Yang, M. Chen et al. // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13, Iss. 9. – Art. 5477.

9. Qu Z. Design and Test of a Grain Cleaning Loss Monitoring Device for Wheat Combine Harvester / Z. Qu, Q. Lu, H. Shao et al. // Agriculture. – 2024. – Vol. 14, No. 5. – P. 671.

10. Shen Y. Research on Acoustic Signal Identification Mechanism and Denoising Methods of Combine Harvesting Loss / Y. Shen, J. Gao, Z. Jin // Agronomy. – 2024. – Vol. 14, No. 8. – P. 1816.

11. Головчук А. Ф. зернозбиральні комбайни / А. Ф. Головчук, О. М. Погорілець, М. О. Погорілець. – Київ : Грамота, 2004. – 272 с.

12. Макаренко М. Г. Комбайни зернозбиральні : навчальний посібник / М. Г. Макаренко, О. Ю. Томашевський. – Харків : ХНТУСГ, 2023. – 214 с.

13. Комбайн зернозбиральний самохідний КЗС-9-1 «Славутич». Технічний опис та інструкція з експлуатації. – Херсон: Херсонський машинобудівний завод, 2012. – 204 с.

14. ISO 25119-1:2018 Tractors and machinery for agriculture and forestry – Safety-related parts of control systems – Part 1: General principles for design and development. – Geneva : International Organization for Standardization, 2018. – 62 p.

15. ISO 23285:2025 Agricultural machinery, tractors, and earth-moving machinery – Safety of electrical and electronic components and systems operating at 32 V to 75 V DC and 21 V to 50 V AC. – Geneva : International Organization for Standardization, 2025. – 48 p.

16. Роговський І. Л., Модернізація системи контролю втрат зерна зернозбирального комбайна / І. Л. Роговський, О. В. Саченко // Техніка і технології АПК. – 2025. – № 4 (121). – С. 18–23. (Здобувачем виконано аналітичний огляд датчиків втрат та розрахунків параметрів системи).

					14.17 - КР.014.0.000 ПЗ	Аркуш
						104
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		