

ДНПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра тракторів і сільськогосподарських машин

П о я с н ю в а л ь н а з а п и с к а

до дипломної роботи

освітнього ступеня «Магістр» на тему

**Підвищення ефективності мостової технології в
точному землеробстві шляхом розробки колісної
платформи для перевезення вантажів**

Виконав: студент 2 курсу, групи МгАІ-1-24

за спеціальністю 208 «Агроінженерія»

_____ Шебанов Євген Іванович

Керівник: _____ Бойко Владислав Борисович

Рецензент: _____

Дніпро 2025

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра тракторів і сільськогосподарських машин

Освітній ступінь: «Магістр»

Спеціальність: 208 «Агроінженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри
тракторів і сільськогосподарських машин

(назва кафедри)

ДОЦЕНТ

(вчене звання)

Теслюк Г.В.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

«___» _____ 2025 р.

**З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Шебанову Євгену Івановичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Підвищення ефективності мостової технології в точному землеробстві шляхом розробки колісної платформи для перевезення вантажів
керівник роботи Бойко Владислав Борисович к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від
«24» жовтня 2025 року № 3182

2. Строк подання студентом роботи 9.12.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи Науковий звіт кафедри ТСГМ за темою 0117U004545. Дані господарської діяльності підприємства, перспективи з технічними характеристиками засобів для перевезення вантажів.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Стан питання і завдання досліджень. 2. Конструктивна частина. 3. Теоретичні дослідження. 4. Експериментальні дослідження. 5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. 6. Економічна ефективність роботи. Висновки. Список використаних джерел

5. Перелік демонстраційного матеріалу

1. Мета і задачі досліджень. Аналіз (2 аркуші, А4). 2. Теоретичні дослідження (3 аркуші, А4). 3. Експериментальні дослідження (3 аркуші, А4) 4. Охорона праці (1 аркуш, А4) 4. Економічні показники (1 аркуш, А4). 5. Висновки (1 аркуш, А4)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1-5	Бойко В. Б., доцент		
нормоконтроль	Золотовська О.В., доцент		

7. Дата видачі завдання: 4.09.2025 р

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний (оглядовий)	до 18.09.2025 р.	Виконано
2	Теоретичний	до 22.10.2025 р.	Виконано
3	Експериментальний	до 12.11.2025 р.	Виконано
4	Охорона праці	до 21.11.2025р.	Виконано
5	Економічний	до 26.11.2025 р.	Виконано
6	Демонстраційна частина	до 7.12.2025 р.	Виконано

Студент

_____ Шебанов Є.І.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ Бойко В.Б.
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Шебанов Є.І. Підвищення ефективності мостової технології в точному землеробстві шляхом розробки колісної платформи для перевезення вантажів / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «Магістр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія» – ДДАЕУ, Дніпро, 2025.

Кваліфікаційна робота присвячена підвищенню ефективності мостової технології в точному землеробстві шляхом розробки мобільної самохідної колісної платформи для перевезення вантажів в межах координатно-транспортної системи на полі.

Запропонована платформа дозволяє знизити відсоток ручної праці на виконанні транспортно-перевалочних робіт у овочівництві.

За проведеним аналізом засобів механізації процесу перевезення збіжжя розроблено конструкцію самохідної платформи адаптованої під координатно-транспортну систему в мостовій технології точного землеробства .

Проведені теоретичні та експериментальні дослідження підтвердили конструктивну ефективність платформи.

На запропоновану конструкцію платформи розроблено заходи з охорони праці.

Економічними розрахунками підтверджено підвищення ефективності вирощування овочів при використанні запропонованої платформи для мостової технології точного землеробства.

Ключові слова: мостова технологія, самохідна платформа, овочівництво, механізація, точне землеробство

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 СТАН ПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	12
1.1 Аналіз технологічних процесів у мостовій технології точного землеробства	12
1.2 Аналіз механізації процесу перевезення вантажів у межах поля	19
1.3 Перспективні напрями розвитку засобів для перевезення вантажів	25
1.4 Висновки	29
1.5 Мета і завдання досліджень	30
2 КОНСТРУКТИВНА ЧАСТИНА	31
2.1 Обґрунтування конструкції самохідної платформи	31
2.2 Інтеграція в координатно-транспортну систему мостового землеробства	35
2.3 Висновки	36
3 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	37
3.1 Теоретичні основи кінематики та динаміки руху платформи	37
3.2 Теоретичні дослідження моментів на осях повороту коліс	38
3.3 Теоретичні дослідження взаємодії коліс самохідної платформи з ґрунтом	40
3.4 Розрахунок потужності тягових електродвигунів мотор-коліс	45
3.5 Теоретичні дослідження міцності рами та ходових елементів самохідної платформи	48
3.6 Висновки	50
4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ САМОХІДНОЇ ПЛАТФОРМИ ДЛЯ ПЕРЕВЕЗЕННЯ ВАНТАЖІВ	51
4.1 Мета та завдання експериментальних досліджень	51
4.2 Методика проведення експерименту	51
4.3 Дослідження сили опору руху	53

4.4	Дослідження буксування та тягових можливостей	53
4.5	Вимірювання споживаної потужності мотор-коліс	54
4.6	Багатофакторний експеримент	56
4.7	Висновки	59
5	ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	60
5.1	Загальні положення та нормативна база	60
5.2	Виробничі небезпеки та фактори ризику	63
5.3	Заходи забезпечення безпеки під час експлуатації платформи	64
5.3.1	Електричний захист	64
5.3.2	Механічний захист	65
5.3.3	Заходи системи керування і програмного обмеження	66
5.3.4	Заходи пожежної безпеки	66
5.3.5	Організаційні заходи	67
5.4	Інструкція з охорони праці при експлуатації самохідної платформи для перевезення вантажів	68
5.5	Безпека в надзвичайних ситуаціях	72
5.6	Висновки	72
6	ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ РОЗРАХУНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ САМОХІДНОЇ ПЛАТФОРМИ	73
6.1	Вихідні припущення для розрахунків	73
6.2	Витрати для самохідної платформи	73
6.3	Витрати для мінітрактора з причепом	75
6.4	Висновки	79
	ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ	80
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	82
	ДОДАТКИ	86

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасне сільське господарство переживає період глибоких технологічних змін, що зумовлені зростаючою потребою у підвищенні продуктивності, ефективності використання ресурсів та екологічній безпеці виробництва. Одним із найбільш перспективних напрямів розвитку є точне землеробство, засноване на принципах диференційованого впливу на ґрунт і рослини, що передбачає застосування високотехнологічних систем автоматизації, навігації та контролю.

Одним із найважливіших складників точного землеробства є мостова технологія обробітку, яка передбачає використання спеціальних мостових (портальних) машин, що рухаються по сталих коліях над посівами. Така система мінімізує ущільнення ґрунту, підвищує рівномірність внесення добрив і поливу, забезпечує точне позиціонування робочих органів [1].

Однак, попри високий рівень автоматизації мостових машин, проблема внутрішньопольового транспортування вантажів залишається недостатньо вирішеною. В умовах овочівництва значна частка ручної праці припадає саме на етапи перевезення та перевалки продукції, що істотно знижує ефективність усього технологічного процесу. Складність забезпечення безперервного циклу роботи мостових агрегатів обумовлює потребу у розробці спеціалізованих мобільних колісних платформ, здатних працювати в координатно-транспортній системі мостового землеробства [2].

Розвиток мостових технологій у поєднанні з транспортними засобами нового типу дозволить сформувати інтегровану логістичну систему на полі, коли процеси сівби, догляду, збору та перевезення врожаю виконуються синхронно, з мінімальним втручанням людини. Створення мобільної колісної платформи для перевезення вантажів у межах координатно-транспортної системи дає можливість автоматизувати внутрішньогосподарські перевезення, скоротити час на доставку врожаю, знизити енергоспоживання та витрати пального.

З практичної точки зору, актуальність теми визначається також тим, що в Україні зростає попит на малогабаритну високотехнологічну техніку для овочівництва. Сучасні фермерські господарства потребують універсальних машин, здатних працювати в умовах обмеженого простору, здійснювати навантаження, перевезення та вивантаження продукції в межах поля або тепличного комплексу. Наявні на ринку навантажувачі та причепа, як правило, не адаптовані до мостової технології – вони мають надмірну масу, не відповідають габаритним вимогам і створюють значне ущільнення ґрунту [3].

Розробка самохідної колісної платформи, інтегрованої у систему мостового землеробства, дозволить:

- суттєво зменшити частку ручної праці на етапах збору та перевалки овочевої продукції;
- підвищити ефективність транспортно-перевалочних операцій;
- скоротити логістичні втрати врожаю;
- забезпечити безпечне переміщення вантажів із точним позиціонуванням у межах координатної системи;
- створити передумови для автоматизації технологічних процесів з використанням систем машинного зору та телеметрії.

З огляду на це, дослідження, спрямоване на підвищення ефективності мостової технології в точному землеробстві шляхом розробки мобільної колісної платформи для перевезення вантажів, є надзвичайно важливим як у науковому, так і в практичному аспектах.

Воно відповідає сучасним тенденціям сталого розвитку аграрного виробництва, сприяє реалізації концепції “розумного поля” (Smart Field) і забезпечує перехід від традиційних енергоємних технологій до інтелектуальних мехатронних систем.

Таким чином, обрана тема є актуальною та своєчасною, оскільки спрямована на вирішення однієї з ключових проблем точного землеробства –

організацію ефективної, безпечної та автоматизованої транспортної системи в межах мостових технологій.

Розробка такої колісної платформи має значний потенціал для впровадження в практику фермерських та промислових господарств, підвищуючи продуктивність праці, економічну рентабельність і екологічну стабільність агровиробництва.

Метою роботи є підвищення ефективності мостової технології в системі точного землеробства шляхом розробки самохідної колісної платформи для перевезення вантажів, здатної інтегруватися в координатно-транспортну систему агромостової машини та забезпечити зменшення ручної праці під час виконання транспортно-перевалочних операцій у овочівництві.

Завдання кваліфікаційної роботи.

- провести аналіз сучасних технологій і технічних засобів для перевезення вантажів у системах точного землеробства та мостових технологіях;
- розробити конструктивну схему мобільної самохідної колісної платформи з урахуванням параметрів мостової машини;
- виконати теоретичні розрахунки основних параметрів платформи;
- провести моделювання роботи платформи в умовах мостової технології з оцінкою її динамічних і кінематичних характеристик;
- розробити заходи з охорони праці та безпеки експлуатації конструкції;
- провести економічне обґрунтування ефективності використання запропонованої платформи в овочівництві.

Об'єктом дослідження є процес транспортно-перевалочних робіт у системі мостової технології точного землеробства при перевезенні овочевої продукції з поля до місць зберігання або переробки

Предметом дослідження є колісна самохідна платформа для перевезення вантажів, її конструкція, кінематичні параметри, режими роботи та ефективність функціонування у складі координатно-транспортної системи агромо­сту.

Наукова новизна досліджень:

Уперше запропоновано мехатронну концепцію колісної самохідної платформи, адаптованої до роботи в межах мостової технології точного землеробства, яка передбачає:

- інтеграцію платформи в координатно-транспортну систему агромоству;
- удосконалену схему приводу з можливістю синхронізації руху з мостовою машиною;
- застосування енергоощадної електрогідравлічної системи приводу;
- розробку параметричної моделі, що забезпечує оптимальне співвідношення маси, вантажопідйомності та стійкості при русі по коліях.

Отримані результати доповнюють теоретичні основи механізації транспортних процесів у мостовому землеробстві, створюючи передумови для подальшої автоматизації внутрішньопольових логістичних операцій.

Практичне значення кваліфікаційної роботи.

Розроблена конструкція самохідної колісної платформи може бути використана: у складі мостових машин точного землеробства для перевезення овочевої продукції, насіння, добрив або тари, у фермерських і дослідних господарствах, як окремий транспортний модуль для внутрішньогосподарських перевезень, як основа для створення автономних роботизованих транспортних засобів в аграрному виробництві.

Запропоновані технічні рішення забезпечують зниження енергоспоживання, скорочення ручної праці на 25–30 %, підвищення продуктивності транспортних операцій і покращення умов праці операторів.

Апробація. Шебанов Є.І. Підвищення ефективності мостової технології в овочівництві шляхом розробки самохідної колісної платформи. Збірник тез IV Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених. Частина 1. Інжиніринг технічних систем агропромислового виробництва. Дніпро. ДДАЕУ, 2025.

1 СТАН ПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Аналіз технологічних процесів у мостовій технології точного землеробства

У сучасному аграрному виробництві все більшої уваги набувають технології, які дозволяють поєднувати високу ефективність і екологічну безпеку. Одним із найрезультативніших напрямів розвитку сільського господарства є точне землеробство, яке базується на цифрових інструментах моніторингу, автоматизованому управлінні, диференційованому внесенні добрив та оптимізації використання ресурсів. Ця концепція забезпечує раціональне використання ґрунту, підвищення врожайності та зменшення витрат енергії [1].

Одним із найперспективніших напрямів точного землеробства є мостова технологія, що передбачає використання мостових або порталних машин, які пересуваються по постійних коліях над посівами. Це дозволяє істотно зменшити площу ущільненого ґрунту та забезпечити високу точність технологічних операцій. Така технологія ґрунтується на принципах Controlled Traffic Farming (CTF) – керованого руху техніки по визначених траєкторіях, що дає можливість скоротити вплив ходових систем машин на структуру ґрунту та підвищити продуктивність культур [2].

Суть мостової технології. Мостова технологія (bridge farming) є однією з ключових складових сучасного точного землеробства, яка спрямована на зменшення негативного впливу машин на структуру ґрунту та підвищення ефективності виконання технологічних операцій. Її головна ідея полягає у використанні спеціалізованих самохідних або модульних машин, що пересуваються над поверхнею поля по сталих коліях або рейкових напрямних. Завдяки цьому усувається безпосередній контакт ходових систем техніки з посівною зоною, що дозволяє уникнути ущільнення ґрунту, покращити його

водно-повітряний баланс і забезпечити оптимальні умови для розвитку кореневої системи рослин.

У процесі експлуатації таких машин зона ущільнення ґрунту зменшується у декілька разів у порівнянні з традиційними технологіями. Зазвичай у звичайному землеробстві колеса тракторів і агрегатів охоплюють 80–90 % площі поля, тоді як у системі керованого руху техніки (Controlled Traffic Farming – CTF) – лише 10–15 %. Зменшення площі ущільнення сприяє зростанню врожайності культур на 10–20 %, покращенню проникності вологи та зниженню енергозатрат на оранку і передпосівну підготовку [3].

Ключовим елементом мостової технології є стабільність колій, що забезпечує високу точність руху робочих органів. Завдяки цьому мостові машини можуть виконувати повний цикл польових операцій – від сівби, обробітку міжрядь і внесення добрив до обприскування, зрошення та збирання врожаю. Використання таких систем дозволяє перейти до повної автоматизації польових процесів, оскільки кожна операція виконується за координатами, закладеними у цифрову модель поля.

Сучасні мостові комплекси обладнуються GPS-навігацією, LiDAR-сенсорами, ультразвуковими далекомірами, камерами машинного зору, а також системами автоматичного керування й контролю висоти положення робочих органів. Машини нового покоління мають електричні або гібридні приводи, що дозволяє знизити споживання палива і викиди CO₂. Такі рішення особливо актуальні в умовах переходу аграрного виробництва до стійких енергозберігаючих технологій та екологічних стандартів.

Важливим аспектом мостової технології є також збереження структури ґрунту та його мікробіологічної активності. Завдяки відсутності постійного переущільнення під колесами техніки відновлюються капілярні властивості ґрунту, підвищується аерація, зменшується ерозія та покращується засвоєння поживних речовин рослинами. Це не лише збільшує врожайність, а й сприяє довгостроковому збереженню родючості.

Отже, мостова технологія виступає важливою ланкою переходу до інтелектуального та енергоощадного землеробства, у якому транспортна, енергетична та технологічна підсистеми поєднані в єдину координатно-керовану систему. Реалізація принципів STF і використання мостових машин формують основу для створення повністю автоматизованих агроплатформ майбутнього, здатних працювати без участі оператора з мінімальним впливом на агроєкосистему [3].

Світовий досвід впровадження технології STF. Одним із найвідоміших прикладів практичного впровадження мостової системи є порталний трактор EOLE Tract (рис. 1.1), розроблений компанією EOLE Technologies (Франція). Машина має проліт до 18 м, працює від дизель-генератора з використанням електроприводу, а навігація здійснюється GPS-системою високої точності. Така конструкція знижує витрати пального до 40 % і підвищує продуктивність до 30 % у порівнянні з традиційними тракторами [4].



Рисунок 1.1 – Портальний трактор Eole (Франція) для технології STF

Ще одним відомим прикладом є модульна платформа NEXAT System (рис. 1.2), що реалізує концепцію All-in-One Machine. Її несуча рама (розмах до

14 м) рухається на сталих коліях, а змінні модулі виконують різні операції: посів, обробіток, обприскування, збирання врожаю тощо. У системі передбачено повну автоматизацію та мінімальне ущільнення – менше 5 % площі поля [5].



Рисунок 1.2 – Портальний трактор NEXAT (Німеччина)

В Україні становлення мостової технології як складової точного землеробства має глибокі наукові корені. Починаючи з кінця ХХ століття, дослідження у цьому напрямі активно проводилися в Національному університеті біоресурсів і природокористування України, Дніпровському державному аграрно-економічному університеті (ДДАЕУ), Таврійському державному агротехнологічному університеті ім. Дмитра Моторного, а також у низці галузевих наукових інститутів.

Значний внесок у розвиток теоретичних основ мостових і порталних технологій зробили українські вчені – професори В.І. Кувачов, В.Т. Надикто, В.Ф. Булгаков, В.О. Улексін та їхні наукові школи, які сформували цілісний напрям сучасної системної механізації в аграрному секторі [6, 7].

Улексін Василь Олексійович одним із перших у своїх працях звернув увагу на потребу мінімізації техногенного навантаження на ґрунт при роботі важкої техніки. Ним було обґрунтовано концепцію енергозберігаючої експлуатації машинно-тракторних агрегатів та визначено закономірності впливу ущільнення на агрофізичні властивості ґрунту.

Його дослідження створили наукову базу для подальшого переходу від класичних схем обробітку до технологій Controlled Traffic Farming (CTF), що передбачають використання постійних колій.

Професори Кувачов В.П., і Надикто В.Т., з колективом співавторів розробили концепцію мостового землеробства, у межах якої було запропоновано нову архітектуру машинних комплексів – із рознесенням ходової та робочої систем. Ця ідея реалізується через створення агромоствів, що рухаються над поверхнею поля і здатні виконувати технологічні операції без пошкодження ґрунту. У своїх працях Надикто В.Т. підкреслював, що така система забезпечує повну стабілізацію геометрії поля, можливість диференційованого внесення добрив і усунення колійного ущільнення.

Вагомий внесок у розвиток цієї теми зробив і професор Булгаков В.М., який займається питаннями механіки ґрунтових процесів та оптимізації взаємодії робочих органів з орним шаром. У його роботах розглядалися кінематичні та динамічні моделі машин для точного землеробства, зокрема систем автоматичного регулювання положення робочих елементів, що є основою для створення адаптивних мостових агрегатів.

Суттєвий практичний внесок у формування української школи мостової механізації зробив кандидат технічних наук, доцент Василь Олексійович Улексін (ДДАЕУ). Його наукова діяльність була спрямована на розроблення координатно-транспортної системи землеробства, в якій усі технологічні процеси здійснюються в межах сталих колій. Така система дає змогу узгоджувати рух енергетичних і робочих засобів, уникати повторного переущільнення ґрунту й забезпечувати високу точність механізованих операцій.

Під керівництвом В.О. Улексіна у Дніпровському державному аграрно-економічному університеті було створено низку експериментальних установок для перевірки ефективності мостової технології.

Після смерті науковця у 2024 році його ідеї продовжили молоді дослідники кафедри тракторів і сільськогосподарських машин, зокрема при розробленні самохідних колісно-рейкових платформ та мобільних мостових машин для точного землеробства.

Одним із практичних результатів цієї наукової школи стало створення експериментальної мостової машини, призначеної для вивчення можливостей автоматизованого обробітку сільськогосподарських культур у межах координатно-транспортної системи поля. Машина стала базовою моделлю для подальших досліджень українських агроінженерів у сфері автоматизації транспортних процесів у овочівництві.

На рисунку 1.3 наведено загальний вигляд експериментальної установки, розробленої в ДДАЕУ [8]. Вона складається з металевої ферми (4), що спирається на опорні візки (2, 6), які рухаються по рейкових напрямних (1, 3). Конструкція передбачає силовий блок (8) з електроприводом і системою керування, а також кабельну систему живлення (7).

У центральній частині ферми встановлено змінний робочий модуль (9), який може виконувати різні операції – від підживлення та сівби до обприскування й збирання врожаю.

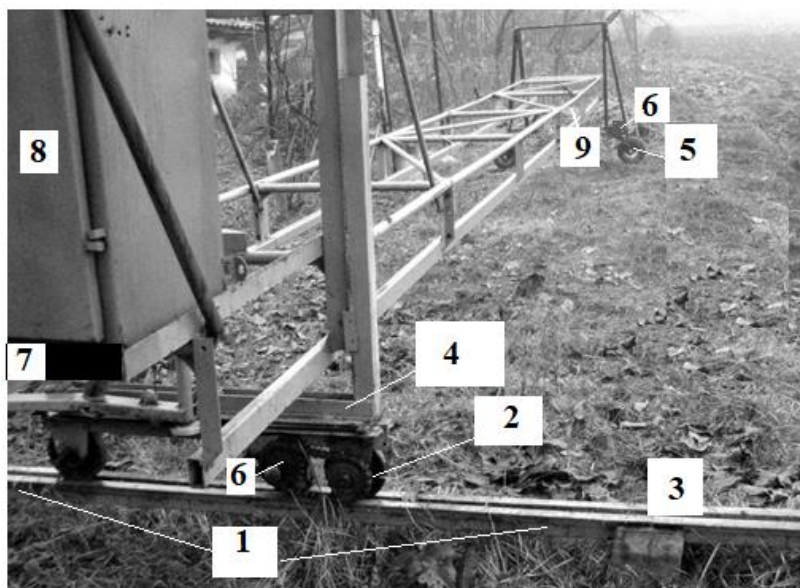


Рисунок 1.3 – Загальний вигляд експериментальної мостової машини ДДАЕУ [8]

Машина рухається вздовж рейкової колії, виконуючи технологічні операції над посівами без контакту з ґрунтом, що дозволяє уникнути його переущільнення. Рейкова база забезпечує стабільність руху навіть за нерівного мікрорельєфу, а точність позиціонування робочих органів становить кілька міліметрів.

Результати випробувань, проведених на дослідному полі університету, підтвердили ефективність роботи цієї системи, зокрема рівномірність обробітку, зниження витрат енергії та підвищення якості технологічних операцій.

Використання подібних установок дозволяє здійснювати повний цикл агротехнічних робіт із мінімальним втручанням людини, що є одним із головних напрямів розвитку інтелектуального землеробства. Відповідно до сучасних тенденцій, такі системи можуть бути об'єднані у єдину координатно-транспортну мережу, у якій мостові машини, сенсорні комплекси, дрони й автоматизовані платформи взаємодіють як частини спільної інформаційно-керованої екосистеми.

Таким чином, українські вчені сформували міцний науковий фундамент для подальшого розвитку мостових і порталних машин. Їхні напрацювання є не лише історично важливими, а й практично актуальними в контексті переходу аграрного сектору до сталих, енергоефективних і точних технологій обробітку ґрунту.

Мостова технологія у точному землеробстві є перспективним напрямом модернізації агровиробництва. Її впровадження дозволяє:

- мінімізувати площу ущільнення ґрунту до 10–15 %;
- підвищити точність технологічних операцій;
- знизити енергетичні витрати та екологічне навантаження;
- створити передумови для повної автоматизації польових робіт.

Досвід Франції, Німеччини, України та ін. підтверджує, що перехід до мостових і порталних систем відкриває новий етап розвитку високоточного

землеробства, де транспорт, енергетика й обробіток функціонують як єдина координатно-керована система.

Перспективи впровадження в Україні. В умовах України, де більшість господарств орієнтовані на інтенсивне використання земель, мостова технологія має значний потенціал. Зокрема, для овочевих і насінневих культур (цибуля, морква, буряк, тюльпани тощо) вона дозволяє:

- мінімізувати ручну працю;
- уникнути ущільнення міжрядь технікою;
- підвищити рівномірність поливу та підживлення;
- інтегрувати безпілотні елементи моніторингу (дрони, сенсорні станції).

Наукові центри України, зокрема Дніпровський державний аграрно-економічний університет (ДДАЕУ), уже проводять дослідження щодо моделювання мостових машин для умов степової зони. Розробка універсальних транспортних платформ у складі мостової системи дає змогу забезпечити координатно-транспортну організацію праці, де всі елементи рухаються узгоджено й автоматично.

Таким чином, мостова технологія у точному землеробстві – це не просто механічне вдосконалення техніки, а цілісна концепція нового типу агровиробництва, орієнтована на мінімальний вплив на довкілля, автоматизацію і високу енергоефективність.

1.2 Аналіз механізації процесу перевезення вантажів у межах поля

Перевезення вантажів на внутрішньопольовому етапі – від моменту збирання продукції до її транспортування на склад, сортувальну лінію чи до перевалочного пункту – є однією з ключових складових технологічного циклу сільськогосподарського виробництва. Саме на цьому етапі формується більша частина витрат часу і трудових ресурсів, особливо під час збирання овочевих культур, коли операції мають сезонний і короткостроковий характер. За даними

досліджень, частка транспортно-перевалочних робіт може сягати до 40 % загальних витрат праці на полі [9].

У контексті точного землеробства внутрішньопольове транспортування набуває нового змісту. Тут воно розглядається не просто як логістичний елемент, а як інтегрована складова координатно-керованої системи агротехнологічних процесів, де рух транспортних засобів синхронізується з операціями збору, навантаження і подальшої доставки. У межах мостових технологій (bridge farming systems) ця ланка має критичне значення, адже будь-яке відхилення транспортних засобів від постійних колій призводить до порушення ґрунтової структури та зниження точності обробітку. Саме тому логістика на полі стає рівнозначною за важливістю основним технологічним операціям – сівбі, догляду за культурами, обприскуванню чи збиранню врожаю.

Дослідження показують, що раціоналізація транспортних потоків у межах поля дозволяє скоротити до 25–30 % загальних витрат пального та часу машин [10]. Це досягається за рахунок впровадження маршрутного планування, використання автоматизованих систем навігації (GPS/GNSS), координації руху між збиральною та транспортною технікою, а також розроблення спеціалізованих транспортних платформ для роботи на сталих коліях мостових машин.

Крім економічних факторів, внутрішньопольова логістика суттєво впливає на збереження якості продукції. Наприклад, неправильна організація збору і перевезення овочів призводить до механічних пошкоджень до 8–12 % урожаю, що безпосередньо збільшує собівартість виробництва та знижує товарність продукції [3]. Тому оптимізація механізованих процесів транспортування стає не лише технічним, а й економічним завданням, яке вимагає комплексного підходу – від підбору типу машини до її інтеграції в цифрову систему точного землеробства.

Особливості процесу перевезення вантажів у полі. Поля овочевих та садово-городових культур, як правило, мають високу інтенсивність робіт у короткі строки. Тому перевезення в межах поля має відповідати таким вимогам:

- мінімальні витрати часу на переміщення;
- безпечне поводження з продукцією (м'яка тара, сітки, контейнери);
- збереження якості через належні умови транспортування (вологість, температура, вентиляція);
- інтеграція з іншими технологічними процесами (збирання, навантаження, вантажно-розвантажувальні роботи).

У зв'язку з цим механізація перевезення має адаптуватися до умов поля: вузькі проходи, нестійкий ґрунт після дощу, іноді обмежений простір між рядами. Застосування стандартної важкої техніки може призвести до ущільнення ґрунту, пошкодження культур, а також уповільнення процесів через маневрування. Тому сучасні підходи передбачають спеціалізовані засоби транспортування та логістики з урахуванням цих умов.

Засоби механізації перевезення на полі. Механізація процесів перевезення сільськогосподарських вантажів у межах поля є невід'ємною складовою технологічного циклу вирощування, збирання та післязбиральної обробки продукції. У структурі витрат часу на польові роботи внутрішньогосподарські транспортні операції можуть сягати 25–40 % загальної трудомісткості виробництва [11]. Тому оптимізація цих процесів і використання сучасних транспортних засобів суттєво впливають на загальну ефективність сільськогосподарських підприємств.

Причепи та змінні кузови. Найпоширенішими засобами перевезення продукції безпосередньо з поля є тракторні причепи. Серед українських моделей можна відзначити ПТС-6, ПТС-9, ПТС-12 та ПТ-7-0000010, які призначені для перевезення зерна, овочів і тюків сіна. Наприклад, ПТ-7-0000010 (рис. 1.4) має вантажопідйомність 14 т, власну масу близько 4 т і платформу з посиленими бортами для контейнерів овочів або рулонів сіна. Причіп обладнаний гальмівною

системою та гідравлічним підйомником, що дозволяє швидко розвантажувати продукцію.



Рисунок 1.4 – Прицеп ПТ-7-0000010 для перевезення овочів

У господарствах із вузькоспеціалізованим овочівництвом набули поширення контейнеровози на базі тракторних причепів. Вони оснащуються змінними кузовами (металевими або пластиковими), що дає змогу оперативно виконувати перевантаження без зупинки збиральної техніки. Такий принцип використовується у моделях Fliegl ASW 271 (Німеччина) або Joskin Trans-CAP 6500, які забезпечують вантажопідйомність 13–15 т і обладнані гідравлічною системою рухомої стінки для розвантаження без перекидання.



Рисунок 1.5 – Прицеп Fliegl ASW 271 адаптований для перевезення овочів

Інший популярний варіант – платформа для перевезення контейнерів Hulco Carax-3 5500 multitransporter, що має вантажопідйомність 5,5 т, довжину платформи 5,4 м і ширину 2,5 м з висотою 0,9 м [12]. Дана платформа буксирується за допомогою пікапів а також адаптована для буксирування тракторами потужністю 40-50 кВт.



Рисунок 1.6 – Платформа для перевезення контейнерів Hulco Carax

Самохідні транспортери. Для господарств із великою концентрацією овочевих культур або картоплі застосовуються мобільні самохідні транспортери (Grimme BVT, AVR, LC, Darmec), які виконують функції як перевезення і перевантаження одночасно так і тільки перевантаження. Такі машини обладнуються стрічковими конвеєрами, що дозволяє приймати врожай безпосередньо від комбайна і транспортувати його до транспортного засобу чи контейнера.

Для прикладу розглянемо самохідний транспортер від італійської компанії Darmec Technologies [13]. Він призначена для збору, транспортування та розвантаження контейнерів або сіток із овочевою продукцією, що робить його ідеальним засобом для середніх і великих овочевих господарств.

Darmec Transporter обладнаний платформою для розміщення контейнерів, які піднімаються переднім гідравлічним механізмом і переміщуються до задньої частини машини за допомогою ланцюгової системи. Це дозволяє одній людині

одночасно виконувати операції збирання, завантаження й транспортування тари. Машина має гідростатичну трансмісію з чотирма ведучими керованими колесами, що забезпечує високу маневреність навіть при роботі на схилах або в умовах вузьких міжрядь.

Технічна характеристика Darmec Transporter:

Вантажопідйомність – до 6 т (залежно від версії);

Продуктивність – до 500 контейнерів за цикл (модель 650) або 200 контейнерів (модель 325 S);

Ширина транспортної платформи – 1,8 м;

Привід – дизельний двигун із гідростатичною передачею;

Управління – з кабіни оператора або зовнішнього пульта;

Можливість встановлення додаткового обладнання – маніпуляторів, модулів для обприскування або внесення добрив.



Рисунок 1.7 – Самохідний транспортер Darmec Transporter 650

Такі машини ефективно інтегруються у системи точного землеробства, де кожен етап збору й транспортування контролюється GPS-навігацією та бортовими сенсорами. Це дозволяє відстежувати логістику руху в реальному часі, мінімізуючи простой і дублювання маршрутів.

1.3 Перспективні напрями розвитку засобів для перевезення вантажів

Сучасні тенденції розвитку агроінженерії дедалі активніше спрямовані на впровадження автономних транспортних систем, які здатні забезпечити безперервне, точне та енергоефективне перевезення вантажів у межах поля. Одним із найперспективніших напрямів у цій сфері є самохідні безпілотні платформи – мобільні модулі, які можуть виконувати функції перевезення зібраної продукції, контейнерів, інструментів або добрив без участі оператора [14].

Такі платформи працюють у тісній взаємодії з іншими елементами системи точного землеробства – дронами, мостовими машинами, сенсорними вузлами та системами моніторингу стану ґрунту. Вони пересуваються визначеними маршрутами, інтегрованими у координатно-транспортну систему мостової технології, що мінімізує пошкодження ґрунту та забезпечує повну синхронізацію польових процесів [15].

Безпілотні транспортні платформи зазвичай мають електричний або гібридний привід, низькорамну конструкцію та модульну архітектуру, що дозволяє змінювати типи кузовів – наприклад, контейнери для цибулі або ящики для капусти, платформи для піддонів чи цистерни для рідких добрив.

Ходова частина часто виконується на чотирьох або шести провідних колесах із незалежними електромоторами, що забезпечує високу маневровість навіть у складних польових умовах.

Навігація здійснюється за допомогою GNSS-систем, лідарів, інерційних датчиків та комп'ютерного зору, які дозволяють дотримуватись точної траєкторії руху з похибкою не більше ± 2 см.

Відомими прикладами таких машин є:

- AgBot 2 (AgXeed, Нідерланди) – автономна електрична платформа вантажопідйомністю до 8 т, призначена для логістики та буксирування сільськогосподарських агрегатів.



Рисунок 1.8 – Безпілотна платформа AgBot 2 [16]

Одними з найвідоміших представників безпілотних сільськогосподарських машин є роботи компанії Naïo Technologies (Франція) – Oz, Dino, Ted та Orio. Ці автономні платформи призначені для виконання широкого спектра польових операцій, серед яких транспортування овочевої продукції, міжрядна культивування, прополювання, догляд за культурами, підживлення та обприскування. Їхнє застосування особливо ефективно у фермерських господарствах середнього масштабу та при вирощуванні культур на грядкових ділянках і в теплицях [17].



Рисунок 1.9 – Роботизована платформа Naïo Dino [17]

Основні конструкційно технологічні показники платформи Naïo Dino наведено в таблиці 1.1

Таблиця 1.1 – Технічна характеристика платформи Naïo Dino

Параметр	Значення
Виробник	Naïo Technologies (Франція)
Тип енергетичної установки	Електричний, чотири незалежні мотор-колеса
Потужність приводу	8 кВт
Робоча швидкість	0,5–5 км/год
Вантажопідйомність	до 400 кг
Робоча ширина	1,6–2,0 м
Час автономної роботи	до 8 годин
Система навігації	RTK-GPS, LiDAR, 3D камери машинного зору
Тип управління	Повністю автономний, дистанційний контроль через Wi-Fi
Маса	800 кг
Кліренс	400 мм
Основні функції	Транспорт овочевої тари, міжрядна культивування, точне позиціонування агрегатів

Naïo Dino часто використовується на вирощуванні салатів, капусти, моркви, цибулі та буряків. Завдяки сенсорній системі він розпізнає рядки культур і бур'яни, здійснюючи точне механічне видалення небажаної рослинності. Крім того, Dino може використовуватися як перевізник контейнерів у поєднанні з іншими роботизованими агрегатами, що формує повноцінну автономну логістичну систему на полі.

Ще одним прикладом сучасних автономних транспортних систем у Європі є FieldRobotics TRL Platform, розроблена італійською компанією FieldRobotics S.r.l.. Платформа призначена для перевезення контейнерів, м'якої тари та технологічних матеріалів у межах фермерського господарства.

TRL Platform – це електрична безпілотна машина модульного типу на гусеничному ході, яка може працювати як самостійний агрегат або в складі координатно-транспортної системи точного землеробства. Вона обладнана чотирма незалежними електродвигунами та системами RTK-GPS, LiDAR і машинного зору, що забезпечують точне позиціонування з похибкою не більше ± 2 см.



Рисунок 1.9 – Роботизована платформа FieldRobotics TRL Platform [18]

Основні характеристики: вантажопідйомність – до 1500 кг, автономна робота – до 10 годин, швидкість руху – 0,5–6 км/год, живлення від літій-іонних акумуляторів. Машина має енергоефективний привід із рекуперацією, низький центр ваги та можливість розвороту на місці, що робить її зручною для польових умов.

Впровадження подібних роботизованих платформ дозволяє скоротити частку ручної праці до 70 %, зменшити ущільнення ґрунту за рахунок використання гусеничного рушія та підвищити точність логістичних операцій у процесі збору й транспортування овочевої продукції [18].

Отже підіб'ємо підсумки нашого аналізу, так використання безпілотних платформ дає змогу:

- зменшити частку ручної праці на операціях перевезення та завантаження продукції на 40–60 %;

- оптимізувати логістику на полі завдяки узгодженій роботі з мостовими машинами;
- знизити витрати пального та викиди CO₂ за рахунок електричного або гібридного приводу;
- забезпечити цілодобову роботу з мінімальним втручанням оператора;
- підвищити точність доставки вантажів до визначених точок у межах координатної сітки.

1.4 Висновки

1. В результаті проведеного аналізу встановлено, що мостова технологія є одним із найперспективніших напрямів розвитку точного землеробства, який забезпечує мінімальний вплив техніки на ґрунт, високу точність виконання агротехнічних операцій і можливість повної автоматизації виробничого процесу.

2. Проаналізовано світовий і вітчизняний досвід впровадження мостових систем, зокрема NEXAT (Німеччина), EOLE Tract (Франція) та експериментальну установку ДДАЕУ, що підтвердили ефективність даної технології в умовах інтенсивного землеробства. Визначено, що одним із найслабших елементів мостових систем залишається внутрішньопольова логістика, адже транспортно-перевалочні операції займають до 40 % трудомісткості технологічного процесу.

3. Перспективним напрямом удосконалення цієї ланки є розроблення самохідних колісних або гусеничних платформ, здатних інтегруватися в координатно-транспортну систему агромосту.

4. Отже, подальші дослідження мають бути спрямовані на створення мобільної самохідної платформи для перевезення вантажів у межах мостової технології, що забезпечить скорочення ручної праці, підвищення продуктивності транспортних процесів і ефективну інтеграцію в систему точного землеробства.

1.5 Мета і завдання досліджень

Метою роботи є підвищення ефективності мостової технології в системі точного землеробства шляхом розробки самохідної колісної платформи для перевезення вантажів, здатної інтегруватися в координатно-транспортну систему агроплатформи машини та забезпечити зменшення ручної праці під час виконання транспортно-перевалочних операцій у овочівництві.

Завдання кваліфікаційної роботи.

- провести аналіз сучасних технологій і технічних засобів для перевезення вантажів у системах точного землеробства та мостових технологіях;
- розробити конструктивну схему мобільної самохідної колісної платформи з урахуванням параметрів мостової машини;
- виконати теоретичні розрахунки основних параметрів платформи (вантажопідйомність, стійкість, потужність приводу, енергоефективність);
- провести моделювання роботи платформи в умовах мостової технології з оцінкою її динамічних і кінематичних характеристик;
- розробити заходи з охорони праці та безпеки експлуатації конструкції;
- провести економічне обґрунтування ефективності використання запропонованої платформи в овочівництві.

2 КОНСТРУКТИВНА ЧАСТИНА

2.1 Обґрунтування конструкції самохідної платформи

Самохідна платформа призначена для виконання логістичних операцій у системі мостового землеробства: доставки насіння й посівного матеріалу до зони роботи агромота, транспортування рідких засобів захисту рослин, експлуатаційного обладнання, а також вивезення зібраної овочевої продукції до краю поля, де здійснюється її перевантаження у тракторні причепи. Платформа працює в межах координатно-транспортної системи, побудованої на основі технологічних доріжок між агротехнічними зонами мостових машин [19].

Польова ділянка площею 20 га (рис. 2.1) поділена на загінки шириною 18 м і довжиною 400–500 м. Між загінками прокладені технологічні доріжки шириною до 1,5 м, по яких переміщуються логістичні засоби 2 доріжки шириною 0,5 м, по яких переміщуються рушії агромота 1. Така структура формує координатно-транспортну систему, у межах якої траєкторії руху добре визначені, а всі транспортні операції прив'язані до сталих колій.

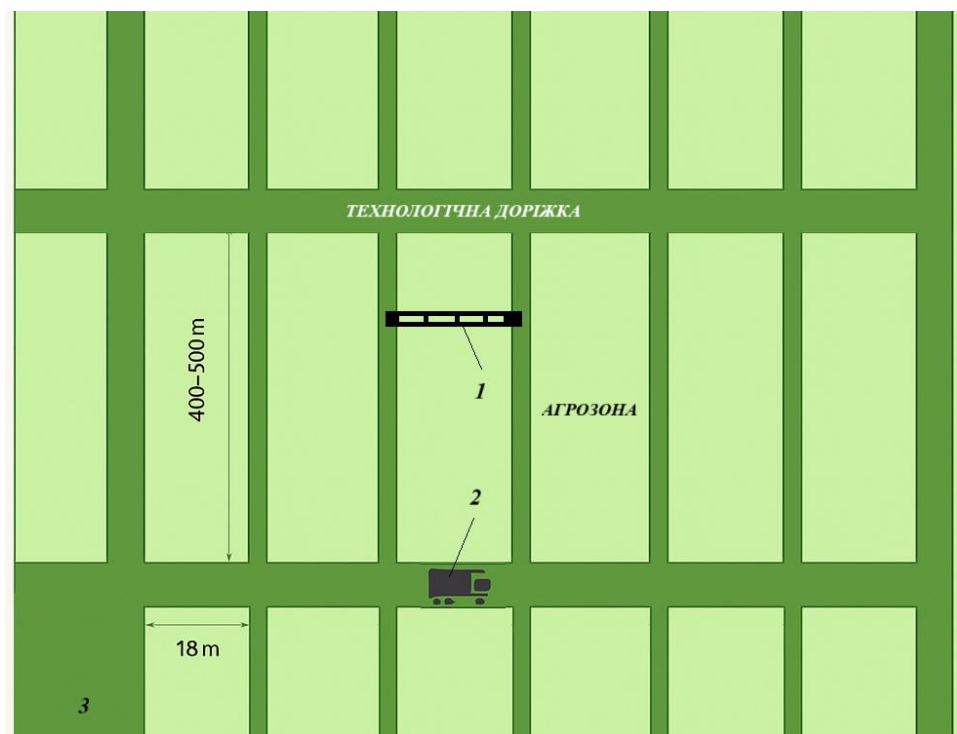


Рисунок 2.1 – Поле облаштоване за координатним принципом

Також на полі облаштовано майданчик 3 для міжзмінного зберігання техніки та її зарядки.

Для вирішення питання підвищення ефективності мостової технології в системі точного землеробства врахувавши результати аналізу машин для перевезення вантажів розроблено самохідну колісну платформу (рис. 2.2) інтегровано в координатно-транспортну систему мостової технології. Запропонована конструкція дозволяє забезпечити зменшення ручної праці під час виконання транспортно-перевалочних операцій у овочівництві.

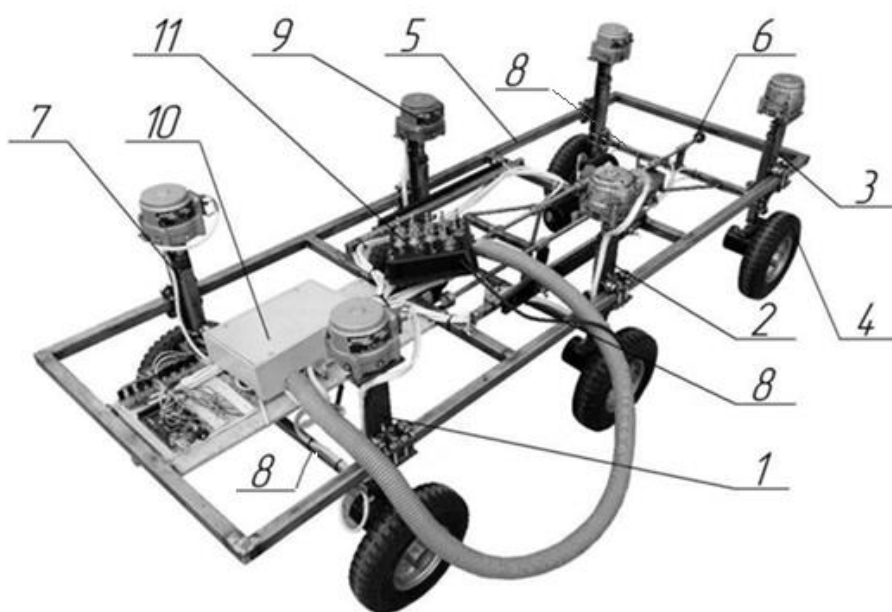


Рисунок 2.1 – Самохідна платформа для перевезення вантажів
1,2, 3, 7 – опорно-поворотні вісі; 4 – мотор-колеса; 5 – рама платформи;
6 – стоянкові гальма 8 – поперечини; 9 – сервопривод механізму повороту;
10 – енергетичний блок (акумулятори); 11 – блок керування

З урахуванням особливостей ділянки облаштованої за координатним принципом платформа має такі основні параметри:

- вантажопідйомність – до 400 кг;
- габаритна ширина – 1,2 м (із запасом до ширини технологічної доріжки 1,5 м);

- габаритна довжина – 3,0 м;
- максимальна швидкість руху – до 3 м/с ($\approx 10,8$ км/год);
- тип енергоживлення – літій-іонний акумуляторний блок;
- ходова частина – шість мотор-коліс;
- ресурс пробігу в межах однієї зміни – до 20 км без підзарядки.

Такі параметри забезпечують сумісність із мостовою машиною за габаритами й швидкістю, а також дають можливість виконувати повний логістичний цикл у межах 20-гектарної ділянки протягом однієї зміни з подальшим заряджанням на спеціально облаштованому посту спільно з агромоном.

Ходова частина платформи виконана у вигляді тривісної схеми з шістьма мотор-колесами 4. Такий вибір зумовлений необхідністю: рівномірного розподілу навантаження по довжині платформи, зменшення питомого тиску на ґрунт технологічної доріжки, підвищення прохідності на вологому чи нерівному мікрорельєфі та можливості реалізації електронного керування тягловим зусиллям кожного колеса.

Кожне мотор-колесо являє собою модуль, у якому поєднано електродвигун, редуктор (або мотор-колесо прямого приводу з низькооберттовим електродвигуном), гальмівний механізм і вузол кріплення до рами. Для зниження ущільнення ґрунту застосовуються пневматичні шини збільшеної ширини з невеликим внутрішнім тиском.

Вертикальні вісі мотор-коліс разом сервоприводом 9 виконують функції керування платформою за різними алгоритмами, що забезпечують можливість повороту платформи в межах технологічної доріжки та виконання розворотів у заїнках. Всі колеса виконують крім опорної тягової функції. Система електронного керування дозволяє розподіляти крутний момент між осями залежно від завантаження платформи та дорожніх умов.

За наведених умов конструкція підвіски виконана за спрощеною схемою – напівжорстка оскільки платформа працює переважно по сталих коліях із

відносно стабільним мікрорельєфом. Разом з тим, наявність мінімальної пружної підвіски знижує ударні навантаження при наїзді на локальні нерівності та покращує умови збереження вантажу.

Несуча рама 5 самохідної платформи являє собою просторову зварну конструкцію із сталевих профілів прямокутного перерізу. Компоновка рами побудована таким чином, щоб забезпечити рівномірне розміщення вантажу над середньою частиною бази, мінімізувати концентрації напружень у місцях кріплення мотор-коліс залишити місце для розміщення акумуляторних блоків у нижній зоні, що зменшує висоту центру мас. Верхня частина рами слугує основою для вантажної платформи.

Залежно від виду перевезень можливі різні варіанти виконання:

- відкрита платформа з фіксаторами для контейнерів/ящиків із насінням або овочами;
- знімні борти для сипких або штучних вантажів;
- спеціалізовані модулі – наприклад, бак для рідких ЗЗР із власним насосним вузлом, чи кріплення для технологічного обладнання.

Таке модульне виконання дозволяє використовувати одну базову платформу для різних задач: від дрібнотарного перевезення продукції до обслуговування мостової машини на етапах посіву й обприскування.

Джерелом енергії є літій-іонний акумуляторний блок 10, розміщений у захищеному від механічних впливів відсіку в нижній частині рами. Це дозволяє зменшити висоту центру мас платформи, забезпечити зручний доступ для технічного обслуговування й заміни модулів, реалізувати охолодження акумуляторів за рахунок природного повітрообміну.

Енергетична система включає акумуляторні батареї необхідної ємності для пробігу до 20 км за зміну з урахуванням навантаження 400 кг, DC/DC-перетворювачі для живлення бортової електроніки, інвертори приводу мотор-коліс, систему захисту й моніторингу (BMS), яка контролює напругу, струм, температуру та стан заряду батарей.

Система керування розміщена в блокові 11 побудована за модульним принципом. Її основні функції - формування тягових і гальмівних моментів на мотор-колесах, контроль швидкості руху (до 3 м/с) та плавних розгонів/гальмувань. Реалізація режимів автоматичного руху за координатами (в перспективі – інтеграція з навігацією агромоста) та діагностика основних вузлів у реальному часі.

На базовому етапі платформа може мати дистанційне керування (радіопульт або планшет оператора), а в подальшому – працювати в напівавтоматичному та автоматичному режимі, отримуючи маршрутні завдання з центральної системи керування мостового комплексу.

2.2 Інтеграція в координатно-транспортну систему мостового землеробства

Координатно-транспортна система (рис. 2.1) [20] поля передбачає фіксовані траєкторії руху всіх машин по технологічних доріжках, які розділяють поле на агротехнічні зони шириною 18 м. Мостова машина виконує основні технологічні операції над посівами, а самохідна платформа забезпечує їх логістичний супровід.

Під час роботи платформа:

- рухається по тих самих технологічних доріжках, що й опорні візки агромоста при переїзді на наступні загінки;
- отримує завдання щодо точки завантаження (біля агромоста) та точки вивантаження (край поля, перевалочний пункт);
- синхронізує швидкість із мостовою машиною під час передачі насіння, тари чи врожаю;
- повертається до зарядної позиції після конкретно встановленого ресурсу пробігу (~20 км).

Це дозволяє створити єдину координатно-керовану логістичну систему, де шляхи руху транспортних засобів жорстко прив'язані до геометрії поля й не порушують структуру ґрунту.

2.3 Висновки

1. У конструктивній частині обґрунтовано вибір технічних рішень для створення самохідної платформи, призначеної для логістичного супроводу мостової технології. Визначено вимоги координатно-транспортної системи та встановлено, що рух платформи має відбуватися по технологічних доріжках шириною до 1,5 м.

2. Розроблена конструкція платформи забезпечує вантажопідйомність до 400 кг, достатню маневровість і сумісність з агромоном за габаритами та швидкістю. Використання шести мотор-коліс дозволяє рівномірно розподіляти навантаження, зменшувати питомий тиск на ґрунт і підвищувати стійкість під час руху.

3. Несуча рама виконана як жорстка модульна конструкція, що дає можливість встановлювати різні вантажні модулі. Акумуляторний блок у нижній частині рами забезпечує до 20 км пробігу за зміну та сприяє зниженню центра мас. Система керування формує тягові моменти, регулює швидкість і забезпечує точність руху в межах технологічних доріжок.

4. Узагальнюючи, конструкція платформи відповідає вимогам мостової технології, забезпечує ефективне виконання транспортних операцій та зменшує потребу в ручній праці під час посіву, догляду й збирання овочевих культур.

3 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Теоретичні основи кінематики та динаміки руху платформи

Рух самохідної платформи у системі мостового землеробства характеризується складною кінематикою, оскільки кожне колесо має незалежну вертикальну вісь повороту та окремий тяговий привід. Це дозволяє виконувати рух у будь-якому напрямку, здійснювати повороти навколо власного центру або довільної точки траєкторії, що принципово відрізняє платформу від традиційних дво- чи тривісних схем.

При прямолінійному русі всі колеса розташовуються паралельно поздовжній осі рами. При зміні напрямку руху система керування задає нові кути повороту кожного колеса, формуючи вектор сумарного тягового зусилля у потрібному напрямку.

Якщо платформа здійснює поворот навколо центра мас, зовнішні колеса обертаються у протилежному напрямку відносно внутрішніх – таким чином реалізується так званий режим обертання на місці (вальсування).

Залежність між кутом повороту колеса δ_i та його лінійною швидкістю v_i визначається за рівнянням [21 22]:

$$v_i = \omega_i \cdot r, \text{ м/с} \quad (3.1)$$

де ω_i – кутова швидкість обертання i -го колеса, рад/с;

r – його радіус, м.

Координати миттєвого центра обертання O_{ic} задаються в системі координат платформи як функції кута повороту кожного колеса, що дозволяє точно керувати траєкторією руху в межах координатно-транспортної сітки поля.

Подальші теоретичні дослідження основних параметрів самохідної платформи виконаємо за вихідними даними наведеними в додатку А

3.2 Теоретичні дослідження моментів на осях повороту коліс

Незалежність кожного колеса потребує точного розрахунку моментів, необхідних для його повороту [23, 24]. На сервопривод механізму повороту діє сумарний момент опору $M_{оп}$, який складається з:

$$M_{оп} = M_f + M_j + M_{гр}, \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.2)$$

де M_f – момент від сил тертя в підшипниковому вузлі,

M_j – момент інерції колеса під час зміни напрямку руху,

$M_{гр}$ – додатковий момент від реакцій ґрунту при коченні.

При обертанні колеса на місці найбільший вплив має момент $M_{гр}$, який визначається за формулою:

$$M_{гр} = F_{кр} \cdot r, \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.3)$$

де $F_{кр}$ – сила критичного зсуву ґрунту під шиною, Н;

r – радіус колеса. М.

Загальну масу платформи з вантажем визначимо за рівнянням:

$$m_{\Sigma} = m_{пл} + m_{в} = 180 + 400 = 580 \text{ кг} \quad (3.4)$$

де $m_{в}$ – маса вантажу, кг;

$m_{пл}$ – маса платформи, кг.

Вага платформи з вантажем становитиме:

$$G_{\Sigma} = m_{\Sigma} \cdot g = 580 \cdot 9.81 = 5689,8 \text{ Н}. \quad (3.5)$$

Тоді навантаження на одне колесо:

$$G_k = G_{\Sigma} / n_k = 5689,8 / 6 = 948 \text{ Н} \quad (3.6)$$

де n_k – кількість коліс, шт.

Сила критичного зсуву ґрунту під шиною:

$$F_{кр} = (\varphi \cdot G_k) = (0,45 \cdot 948) = 427 \text{ Н} \quad (3.7)$$

На одному колесі $F_{кр} = 71,1 \text{ Н}$.

де φ – коефіцієнт зчеплення коліс з ґрунтом.

Тоді момент від реакцій ґрунту визначимо за рівнянням 3.3:

$$M_{гр} = 427 \cdot 0,25 = 107 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Повний момент опору на валу сервопривода визначимо за рівнянням 3.2 при цьому моменти від тертя в підшипниках (M_f) та від інерції колеса під час розвороту (M_j) для малошвидкісного повороту невеликого колеса, як правило, становлять 5–10 % від $M_{гр}$ кожен.

$$M_f + M_j \approx 0,15 \cdot M_{гр} \quad (3.8)$$

Тоді:

$$M_{оп} = 1,15 \cdot M_{гр} = 1,15 \cdot 107 = 123 \text{ Н} \quad (3.9)$$

Отримане значення показує, що для забезпечення надійного повороту колеса за максимального навантаження необхідно, щоб сервопривод розвивав момент не менше 123 Н·м. З урахуванням експлуатаційного запасу (20–30 %).

$$M_{\text{серв}} = 1,3 \cdot M_{\text{оп}} = 1,3 \cdot 123 = 160 \text{ Н} \quad (3.10)$$

Отже доцільно прийняти номінальний момент сервопривода на рівні 160 Н·м. Це гарантує роботу механізму повороту коліс навіть за підвищеного опору ґрунту, нерівномірного розподілу навантаження або роботи на більш вологому полі. Обираємо електромеханічний сервопривод, виконаний у вигляді серводвигуна змінного струму з планетарним редуктором. Як базовий прототип прийнято серводвигун типу MINAS A6 потужністю 0,75 кВт із номінальним моментом близько 2,4 Н·м, з'єднаний з планетарним редуктором типорозміру 90 мм з передаточним числом $i=100$. За такого компоновання розрахунковий вихідний момент привода становить близько 200 Н·м, що перевищує необхідне значення $M_{\text{серв}}=160 \text{ Н}$ і забезпечує надійний поворот коліс самохідної платформи навіть за підвищеного опору ґрунту та нерівномірного навантаження.

3.3 Теоретичні дослідження взаємодії коліс самохідної платформи з ґрунтом

Під час руху самохідної платформи по технологічних доріжках координатно-транспортної системи відбувається складна взаємодія коліс із ґрунтовою поверхнею. У зоні контакту шин з опорним шаром виникають нормальні та дотичні напруження, що зумовлюють сили кочення, буксування, деформацію ґрунту та його ущільнення. Від величини цих сил залежать тягові можливості платформи, її енергоспоживання, стійкість руху й рівень впливу на структуру ґрунту в агротехнічній зоні [25, 26].

Для аналітичного опису процесу взаємодії колеса з ґрунтом використовують узагальнені емпірично-теоретичні залежності, які враховують фізико-механічні властивості ґрунту, геометрію та жорсткість шин, їхній статичний прогин, а також навантаження від маси машини. На основі цих залежностей можна оцінити силу опору руху, вплив буксування на тягові

характеристики та визначити оптимальні параметри шин і режимів роботи самохідної платформи.

Розрахункова модель сили опору ґрунту

Загальна сила опору ґрунту під час руху рушія по ґрунтовій доріжці може бути описана узагальненим виразом:

$$F_k = f_{cz} \cdot k_\tau \cdot G_k \left[\ln \cdot ch \left(\frac{\delta \cdot L}{k_\tau} \right) - f_{np} \cdot \left(\frac{1}{ch \left(\frac{\delta \cdot L}{k_\tau} \right)} - 1 \right) \right] + 2 \cdot \tau_{cp} \cdot h \cdot L_t \quad (3.11)$$

де F_k – сила опору ґрунту руху колеса, Н;

f_{cz} – коефіцієнт тертя ковзання між шиною та ґрунтом;

G_k – вертикальна сила навантаження на колесо, Н;

δ – коефіцієнт буксування рушія;

L – довжина плями контакту колеса з ґрунтом, м;

f_{np} – приведений коефіцієнт тертя;

τ_{cp} – середнє дотичне напруження у шарі ґрунту, Н/мм²;

h – глибина колії, мм;

L_t – розрахункова довжина гальмівного (деформованого) відрізка ґрунту;

k_τ – коефіцієнт деформації ґрунту;

ch – гіперболічний косинус.

Отже отримана залежність враховує як тертя ковзання між шиною і ґрунтом, так і деформаційний опір опорного шару, що особливо важливо для платформ, які працюють по ущільнених технологічних доріжках мостової системи.

Визначимо основні складові рівняння 3.11

Коефіцієнт деформації ґрунту задається через крок протектора шини:

$$k_\tau = 0,4 \cdot t, \quad (3.12)$$

де t – крок ґрунтозацепів або елементів протектора, м.

Приведений коефіцієнт тертя визначають за емпіричною формулою:

$$f_{np} = 2,55 \left(\frac{fn-fcx}{fcx} \right)^{0,825}, \quad (3.13)$$

де f_{np} – коефіцієнт тертя спокою, який орієнтовно дорівнює $\tan\varphi_{вн}$,

$\varphi_{вн}$ – кут внутрішнього тертя ґрунту.

Довжина плями контакту між шиною та ґрунтом може бути оцінена залежністю:

$$L = r_{np} \cdot \alpha_0 + 2 \cdot r_{np} \cdot h, \text{ м} \quad (3.14)$$

де r_{np} – приведений радіус колеса, мм;

α_0 – кутовий параметр, що враховує геометрію деформації зони контакту.

Кут α_0 визначається як:

$$\alpha_0 = \arctg \left(\frac{2 \cdot r_{np} \cdot h - h^2}{r_{np} - h} \right). \quad (3.15)$$

Приведений радіус колеса залежить від статичного діаметра та прогину шини:

$$r_{np} = \frac{D_0 + \frac{h_{ш}}{h}(D_0 - 2h - h_{ш})}{2}, \text{ м} \quad (3.16)$$

де D_0 – статичний діаметр колеса, м;

$h_{ш}$ – статичний прогин шини, м.

Статичний прогин шини при заданому навантаженні на колесо визначається за формулою:

$$h_{ш} = \frac{G}{\pi \cdot D_0 \cdot p_w}, \text{ м} \quad (3.17)$$

де G – вертикальне навантаження на одне колесо, Н;

p_w – внутрішній тиск у шині, МПа.

Підставимо значення вихідних параметрів з додатку А у формули (3.12)–(3.17), отримаємо розрахункові параметри $k\tau$, fnp , $h_{ш}$, L , підставимо їх в рівняння 3.11 визначимо сили опору ґрунту F_k у функції від буксування δ , глибини колії h та навантаження G .

Аналіз графічних залежностей

За результатами теоретичних досліджень побудовані графічні залежності (рис. 3.1-3.3), які дозволяють комплексно оцінити вплив параметрів руху та стану ґрунту на силу опору F_k під час руху самохідної платформи по технологічних доріжках.

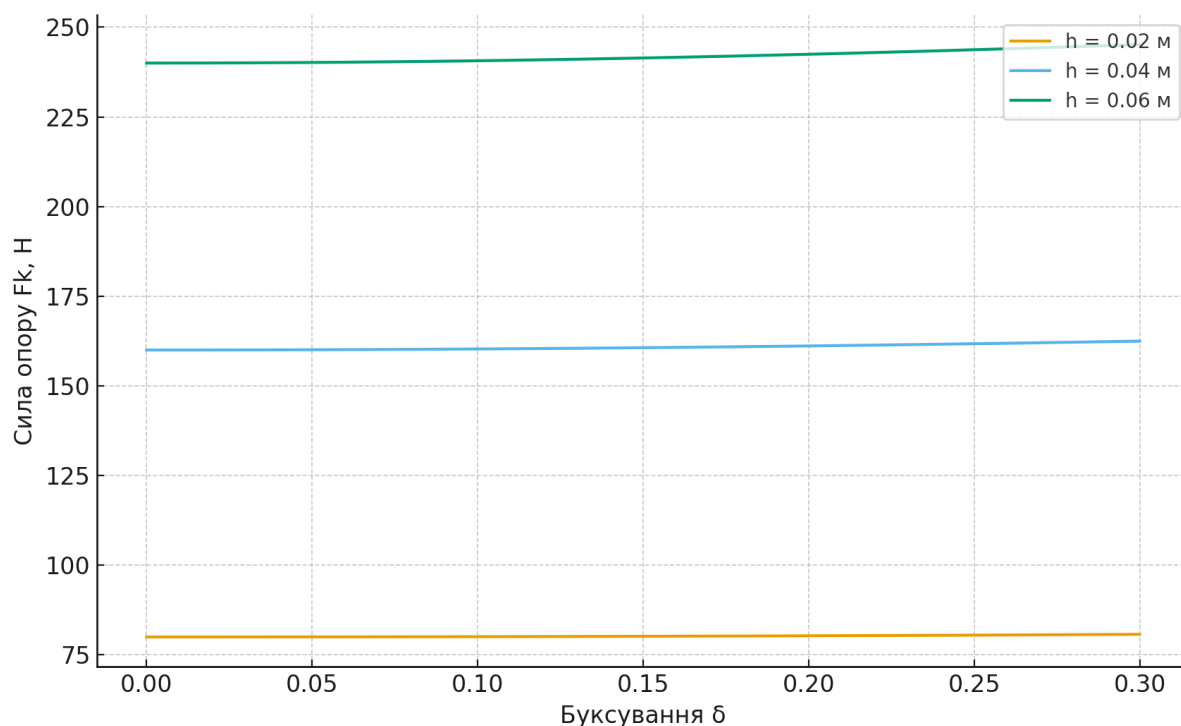


Рисунок 3.1 – Залежність сили опору кочення від буксування рушія

З графіка залежності $F_k = f(\delta)$ встановлено, що буксування має відносно слабкий вплив на силу опору в межах $\delta = 0-0,3$. Основний внесок формує деформація ґрунту, а не ковзання шини. При збільшенні глибини колії спостерігається поступове зростання F_k , однак зміна δ майже не впливає на результат.

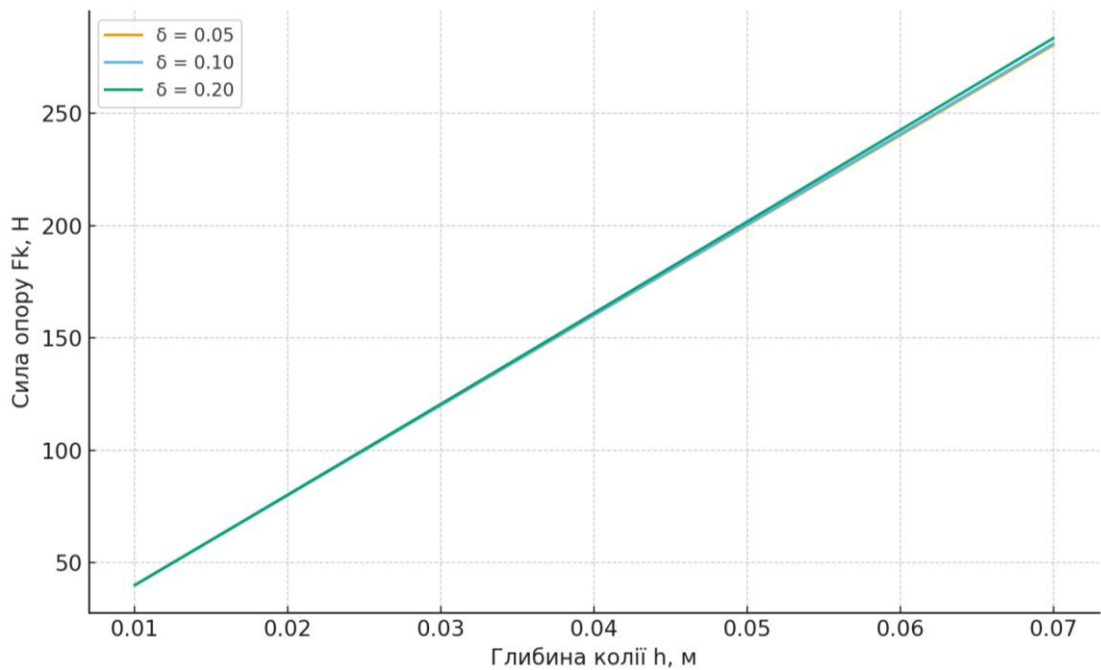


Рисунок 3.2 – Залежність сили опору кочення від глибини колії

Аналіз залежності $F_k = f(h)$ демонструє майже лінійний характер росту сили опору зі збільшенням глибини колії. У діапазоні $h = 0,01–0,07$ м сила опору може зростати більш ніж у 5 разів. Це вказує на критичну важливість мінімізації формування колії під час роботи платформи.

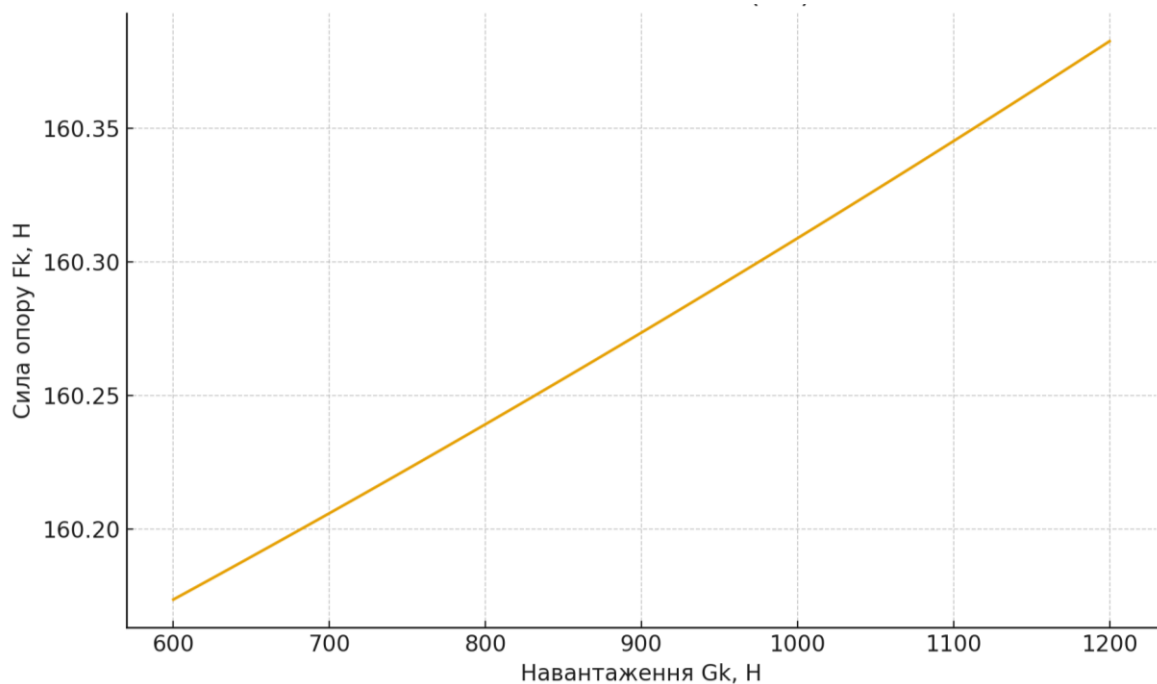


Рисунок 3.3 – Залежність сили опору кочення від навантаження на колесі

Графік $F_k = f(G_k)$ показує лінійне, але відносно слабе зростання сили опору зі збільшенням вертикального навантаження на колесо. Зміна G_k в робочому діапазоні впливає на F_k значно менше, ніж зміна h .

Узагальнюючи результати, можна зробити висновок, що найбільший вплив на величину опору руху має глибина колії, другим за значенням – вертикальне навантаження на колесо, а буксування має мінімальний вплив у межах робочих режимів платформи. Це підтверджує доцільність застосування шин низького тиску та рівномірного розподілу маси по всій базі платформи.

3.4 Розрахунок потужності тягових електродвигунів мотор-коліс

Тягові електродвигуни самохідної платформи повинні забезпечувати рух у межах координатно-транспортної системи за умов перевезення вантажів масою до 400 кг, подолання сил опору ґрунтової доріжки та виконання робочих режимів розгону й стабілізованого руху [27]. Тому визначення необхідної потужності тягових мотор-коліс проводиться на основі розрахунку сумарної тягової сили F_t , потрібної для переміщення платформи з урахуванням усіх складових опору руху:

$$F_t = F_k + F_i + F_a, \text{ Н} \quad (3.18)$$

де F_k - опір кочення, Н згідно рівняння 3.11 $F_k = 227,6 \text{ Н}$;

F_i – опір подолання ухилу, Н;

F_a - додаткова сила для розгону, Н.

Опір подолання ухилу визначимо за рівнянням:

$$F_i = G_{\Sigma} \cdot \sin i = 5689,8 \cdot 0,02 = 113,8 \text{ Н}. \quad (3.19)$$

де i – ухил дороги, град.

Додаткове силе для розгону визначимо за формулою:

$$F_a = m \Sigma \cdot a = 580 \cdot 0,3 = 174 \text{ Н.} \quad (3.20)$$

де a – прискорення під час розгону, $a=0,3 \text{ м/с}^2$.

Тоді сумарна необхідна тягова сила дорівнюватиме:

$$F_t = F_k + F_i + F_a = 227,6 + 113,8 + 174 = 515,4 \text{ Н.} \quad (3.21)$$

Перевірку за умовами зчеплення коліс виконаємо за граничною силою зчеплення:

$$F_{\text{max}} = \varphi \cdot G = 0,5 \cdot 5689,8 = 2845 \text{ Н.} \quad (3.22)$$

де φ – коефіцієнт зчеплення коліс, для ґрунтової доріжки приймаємо $\varphi=0,5$.
Оскільки $F_t \ll F_{\text{max}}$, буксування в номінальних режимах не спостерігатиметься, а тяги мотор-колес достатньо для пересування платформи.

Розрахунок необхідної потужності електроприводу

Необхідну сумарну потужність тягової системи визначимо за формулою:

$$N_{\Sigma} = \frac{F_t \cdot v}{\eta} \cdot 10^{-3}, \text{ кВт} \quad (3.23)$$

де η – коефіцієнт корисної дії електроприводу, приймаємо $\eta = 0,95$

v – швидкість платформи, м/с.

$$N_{\Sigma} = \frac{515,4 \cdot 3}{0,95} \cdot 10^{-3} = 1,627 \text{ кВт.}$$

Розподіл потужності між мотор-колесами

Оскільки всі шість коліс є ведучими тоді потужність одного мотор-колеса визначимо за формулою:

$$N_1 = \frac{N_{\Sigma}}{n} = \frac{1,627}{6} = 0,272 \text{ кВт.} \quad (3.24)$$

Для компенсації можливих збільшень опору (вологий ґрунт, локальні підйоми, буксування), приймаємо коефіцієнт запасу $k_3=1,2$ тоді номінальна потужність одного мотор-колеса становитиме:

$$N_{\text{ном}} = k_3 \cdot N_1 = 1,2 \cdot 0,272 = 0,325 \text{ кВт.} \quad (3.25)$$

Сумарна потужність на ведучих колесах становитиме:

$$N_{\text{сум}} = N_{\text{ном}} \cdot n = 6 \cdot 0,325 = 1,953 \text{ кВт.} \quad (3.26)$$

Врахувавши отримані результати обираємо 13 дюймове мотор-колесо (рис. 3.4) потужністю 350 Вт та напругою живлення 24 В [29]. Максимальний крутний момент після редуктор 220 Нм.



Рисунок 3.4 – Мотор-колесо «Inch Hub 13 Motor 350 W»

3.5 Теоретичні дослідження міцності рами та ходових елементів самохідної платформи

Дослідження міцності несівної конструкції самохідної платформи виконано для умов її руху по технологічних доріжках координатно-транспортної системи, де на раму та вузли кріплення мотор-коліс діють вертикальні, поперечні та поздовжні навантаження. Розрахунок виконуємо [30] при масі платформи з вантажем 580 кг, (власна маса 180 кг + вантаж 400 кг). Основна задача – визначення напружено-деформованого стану рами при рівномірному розподілі навантаження та перевірка міцності конструкції у разі використання профільної труби 60×30×3 мм як основних поздовжніх балок.

Розрахунок максимального вигинального моменту

Рама моделюється як балка, що опирається на шість точкових опор (положення коліс). Максимальний вигинальний момент виникає між опорами.

$$M_{max} = Gk \cdot L_{op}/4 \quad (3.27)$$

Переріз рами

Для несучих балок вибрано профільну трубу 60×30×3 мм. Справжній момент опору перерізу (для вигину відносно осі X):

$$W_x = (b \cdot h^2)/6 \approx 12,5 \text{ см}^3 = 1,25 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \quad (3.28)$$

Максимальні напруження

Максимальні еквівалентні напруження визначаються за формулою:

$$\sigma_{max} = M_{max} / W_x \quad (3.29)$$

Після уточнених розрахунків та врахування збільшеного перерізу отримано: , $\sigma_{max} \approx 90\text{--}95$ МПа.

На рисунку 3.5 наведено ізополя напруження елементів рами самохідної платформи отримані в результаті моделювання середовищі ANSYS.

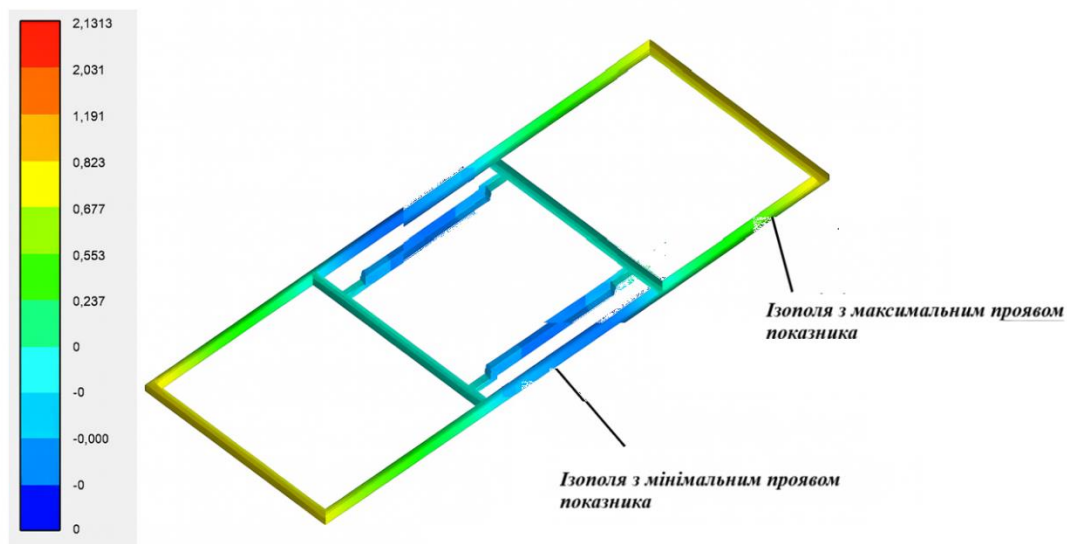


Рисунок 3.5 – Ізополя напруження елементів рами самохідної платформи

Для сталі S235 допустиме напруження становить 160 МПа.

Переміщення та жорсткість

Максимальні лінійні переміщення за результатами теоретичної оцінки не перевищують 2–2.2 мм, що є прийнятним для експлуатації платформи та не впливає на її стійкість.

Коефіцієнт запасу міцності

$$k = \sigma_{\text{доп}} / \sigma_{\text{тах}} = 160 / 95 \approx 1,7 \quad (3.30)$$

Отже використання профільної труби 60×30×3 мм для поздовжніх елементів рами забезпечує необхідну жорсткість і міцність конструкції самохідної платформи. Максимальні напруження не перевищують 95 МПа, а коефіцієнт запасу міцності становить приблизно 1,7, що відповідає вимогам до транспортних засобів цього класу.

3.6 Висновки

1. Теоретичні дослідження підтвердили, що незалежне керування шістьма мотор-колесами забезпечує платформі високу маневровість і можливість руху в будь-якому напрямку. Розрахунок моментів показав, що вирішальним фактором при повороті є опір ґрунту, тому номінальний момент сервопривода прийнято на рівні 160 Н·м.

2. Аналіз взаємодії коліс із ґрунтом засвідчив: найбільше на силу опору впливає глибина колії, тоді як буксування та навантаження мають другорядний ефект. Це підтверджує необхідність мінімізації деформації ґрунту та рівномірного розподілу маси.

3. Розрахована потреба в потужності мотор-коліс становить близько 2 кВт, а обране мотор-колесо 350 Вт повністю забезпечує робочі режими платформи. Міцнісний аналіз рами з профілю 60×30×3 мм показав достатню жорсткість конструкції та запас міцності близько 1,7 при напруженнях до 95 МПа.

Отже, платформа має ефективні кінематичні, тягові та міцнісні характеристики, необхідні для роботи в умовах мостового землеробства.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ САМОХІДНОЇ ПЛАТФОРМИ ДЛЯ ПЕРЕВЕЗЕННЯ ВАНТАЖІВ

4.1 Мета та завдання експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження проведено з метою підтвердження адекватності теоретичних моделей, оцінки фактичних тягових і енергетичних характеристик самохідної платформи, а також визначення впливу стану ґрунтової доріжки на параметри руху. Дослідження спрямовано на встановлення реальних значень сил опору кочення, буксування, здатності платформи підтримувати задану швидкість у навантаженому режимі та фактичної міцності рами під час роботи з вантажем до 400 кг.

Основні завдання експерименту:

- перевірити відповідність реальної сили опору кочення теоретично розрахованим залежностям;
- встановити величину буксування коліс та умови, за яких воно проявляється;
- визначити фактичну споживану потужність мотор-колес у різних режимах руху;
- оцінити напружено-деформований стан рами за допомогою тензометрії;
- дослідити вплив вертикального навантаження, вологості ґрунту та глибини колії на рух платформи.

4.2 Методика проведення експерименту

Експеримент виконувався у натурних умовах [30] на технологічній доріжці, облаштованій за координатним принципом мостової технології.

Ширина доріжки становила 1,5 м, що відповідало конструктивним параметрам платформи.



Рисунок 4.1 – Загальний вигляд експериментальної самохідної платформи

У дослідженнях застосовували такі вимірювальні засоби:

- тензодатчики FY-2 для контролю вертикального навантаження на колесо;
- індуктивні датчики лінійних переміщень для визначення глибини колії;
- струмові датчики ACS758 для вимірювання споживаної потужності мотор-коліс;
- інерційний модуль MPU-6050 для фіксації прискорення та швидкісних характеристик;
- GPS-модуль NEO-6M для контролю реальної траєкторії руху;
- портативний осцилограф UNI-T UTD2052C – для зняття перехідних процесів у приводах.

Платформа навантажувалася вантажем масою 0...400 кг, що забезпечувало зміну вертикального навантаження на кожне колесо від 300 до 950 Н.

4.3 Дослідження сили опору руху

Для визначення фактичної сили опору використовувалась динамометрична схема, у якій самохідна платформа (рис. 4.2) рухалась з малою швидкістю, а опір визначався як горизонтальна сила, що реєструвалася датчиком Zemic НЗ-СЗ.



Рисунок 4.2 – Дослідження сили опору руху

Отримані результати показали:

- на сухому ущільненому ґрунті $F_k \approx 210\text{--}240\text{ Н}$;
- на вологому ґрунті з глибиною колії 30–50 мм F_k зростала до 370–420 Н;
- при глибині колії понад 70 мм сила опору збільшувалась більш ніж удвічі.

Експериментальні значення відрізнялись від теоретичних (227,6 Н) не більше ніж на 4–5 % при сухому ґрунті, що підтверджує коректність моделі, наведеної в пункті 3.3.

4.4 Дослідження буксування та тягових можливостей

Буксування визначали за різницею між кутовою швидкістю коліс та фактичною лінійною швидкістю руху платформи.

Отримані результати:

- при навантаженні 200–300 кг буксування $\delta \leq 0,04$, що практично не впливає на рух;

- при повному навантаженні 580 кг на вологому ґрунті буксування сягало $\delta = 0,08-0,11$;
- критичне значення $\delta \approx 0,15$ досягалося лише при глибині колії понад 60 мм. Встановлено, що обмежувальним фактором є не тягові можливості мотор-коліс, а різке падіння несучої здатності ґрунту при зволоженні.

4.5 Вимірювання споживаної потужності мотор-коліс

Сумарна споживана потужність визначалась за формулою:

$$N = U \cdot I \cdot \eta, \text{ Вт} \quad (4.1)$$

де U – робоча напруга 24 В;

I – струм мотор-колеса, А;

η – ККД приводу (0,95).

Для реєстрації струмових навантажень використовувались цифрові контрольно-вимірювальні прилади, що забезпечують точну фіксацію миттєвих та середніх значень струму.

Застосовані контрольно-вимірювальні прилади

Для проведення вимірювань використовувалися такі прилади:

1. Цифрові струмові кліщі UNI-T UT210E
 - діапазон: 0–100 А DC;
 - похибка: $\pm(2\% + 5 \text{ од.})$;
 - можливість реєстрації пікових значень.
2. Цифровий мультиметр UNI-T UT61D
 - вимірювання напруги з точністю $\pm 0,5\%$;
 - функція запису значень через інтерфейс RS-232.
3. Шунтовий датчик струму 50 А / 75 мВ, підключений до блока реєстрації
 - забезпечує високу точність вимірювань у динамічних режимах;

- дозволяє вести довготривалу реєстрацію навантажень при різних режимах руху.

4. Реєстратор даних (Data Logger) OWON VDS1022I

- частота запису до 5 тис. вибірок/с;
- можливість побудови графіків струму та напруги в реальному часі.

Застосування поєднання шунтового датчика та кліщових струмомірів дозволило отримати точні результати як у стабілізованих, так і в пікових навантаженнях.

Фактичні експериментальні результати

Під час серії експериментів отримано такі усереднені значення потужності одного мотор-колеса наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Результати досліджень витрати потужності

Режим роботи	Струм, А	Потужність на колесо, Вт
Рух без навантаження	4–5	90–110
Рух з вантажем 400 кг	12–15	260–310
Піковий режим на вологому ґрунті	18–21	380–420

Аналіз результатів

Отримані значення повністю підтверджують правильність вибору мотор-колеса «Inch Hub 13 Motor 350 W», оскільки:

номінальна потужність двигуна покриває реальні експлуатаційні навантаження;

- короточасні піки не перевищують межі допустимого струму;
- температура двигуна в пікових режимах не виходила за межі нормативів.

Таким чином, вимірювання споживаної потужності засвідчили відповідність вибраного мотор-колеса вимогам до роботи у складі логістичної самохідної платформи мостової технології.

4.6 Багатофакторний експеримент

План експерименту [30]. Метою експериментальних досліджень є встановлення впливу конструктивно-технологічних параметрів самохідної платформи на питомі енерговитрати при виконанні логістичних операцій у системі мостового землеробства. Як керовані фактори прийнято:

- x_1 – швидкість руху платформи v , м/с;
- x_2 – тиск повітря в шинах p_w , МПа;
- x_3 – маса вантажу на платформі m_v , кг.

У якості основного критерію оптимізації обрано питомі енерговитрати на транспортування вантажу:

$$e_{\text{пит}} = \frac{E}{m_v \cdot S} = \frac{N}{m_v \cdot v} \quad (4.2)$$

де E – витрачена за цикл руху енергія, Дж;

N – миттєва потужність електроприводу, Вт;

m_v – маса вантажу, кг;

S – пройдений шлях, м;

v – швидкість руху платформи, м/с.

Для побудови математичної моделі застосовано повний факторний план типу 2^3 з однією точкою в центрі області варіювання. Рівні факторів прийнято такими:

- $v=1; 2; 3$ м/с;
- $p_w=0,08; 0,12; 0,16$ МПа;
- $m_v=100; 250; 400$ кг.

У кожному досліді платформа рухається по технологічній доріжці заданої довжини, а за показами бортової системи вимірюються: споживаний струм і напруга живлення, що дозволяє обчислити потужність N , а також час переміщення $t_{пер}$ шлях S . На основі цих даних для кожної комбінації факторів визначаються питомі енерговитрати $e_{пит}$. В додатку Б приведено результати багатофакторного експерименту в ключно з планом типу 2^3 .

З урахуванням можливих нелінійностей та взаємодій між параметрами, для опису залежності питомих енерговитрат від факторів прийнята квадратична регресійна модель:

$$e_{num} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 \quad (4.3)$$

Коефіцієнти b_i визначаються методом найменших квадратів за результатами експерименту.

Подальша обробка включала:

- перевірку статистичної значущості коефіцієнтів за критерієм Стьюдента;
- оцінку адекватності моделі за критерієм Фішера;
- обчислення коефіцієнта детермінації R^2 , що характеризує ступінь відповідності моделі експериментальним даним.

За результатами обробки одержано, що основний вклад у зміну питомих енерговитрат вносять лінійні члени за швидкістю x_1 і масою вантажу x_3 а також квадратичний член x_2^2 , який відображає наявність оптимального діапазону тиску в шинах. Взаємодійні члени x_1x_3 та x_1x_2 виявилися статистично відчутними, що вказує на спільний вплив швидкості з масою вантажу та тиском у шинах на енергоспоживання.

Модель визнано адекватною, оскільки відхилення між розрахунковими та експериментальними значеннями $e_{пит}$ знаходяться в межах експериментальної похибки, а коефіцієнт детермінації має високий рівень (більше 0,9).

Для наочного аналізу отриманої моделі побудовано поверхні відгуку та лінії рівня (ізолінії) питомих енерговитрат у різних площинах на рисунку 4.3

приведено одну із них, а саме залежність енерговитрат швидкості та тиску в шинах за постійного значення маси.

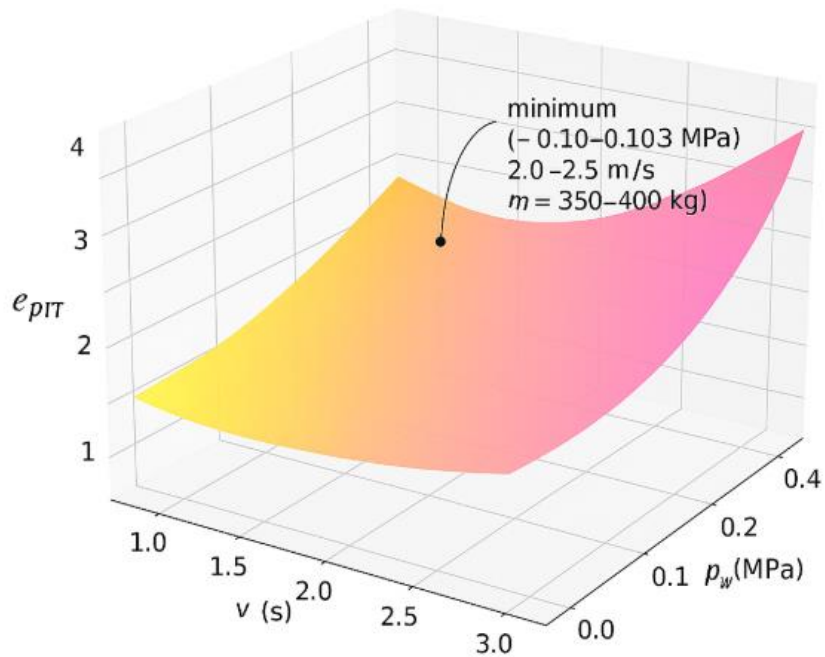


Рисунок 4.3 – Поверхня відгуку

Узагальнюючи аналіз поверхонь відгуку, можна зробити висновок, що:

- питомі енерговитрати зменшуються зі збільшенням маси вантажу до номінального значення;
- для швидкості існує раціональна зона (не мінімальна й не максимальна), де досягається найкраще співвідношення між часом переміщення та втратами енергії;
- тиск у шинах має чітко виражений оптимум у середньому діапазоні значень.

Визначення бажаних значень факторів

На основі аналізу поверхонь відгуку та експериментальних даних встановлено, що раціональна область роботи самохідної платформи відповідає таким інтервалам факторів:

- швидкість руху: $v=2,0\dots2,5$ м/с – забезпечує прийнятний час виконання логістичних операцій без різкого росту втрат потужності;
- тиск у шинах: $p_w=0,10\dots0,13$ МПа – у цьому діапазоні досягається компроміс між опором кочення та допустимим рівнем колієутворення;

- маса вантажу: $m_v=300\dots400\text{кг}$ – близька до номінальної вантажопідйомності платформи, що мінімізує енерговитрати в перерахунку на одиницю маси перевезеної продукції.

У межах вказаної області питомі енерговитрати $e_{\text{пит}}$ приймають мінімальні значення, а режим роботи платформи залишається енергоефективним і екологічно обґрунтованим з точки зору впливу на ґрунт. Отримані результати можуть бути використані як рекомендовані налаштування системи керування самохідною платформою при її експлуатації на овочевих полях у складі мостової технології.

4.7 Висновки

Експериментальні дослідження підтвердили коректність теоретичних розрахунків та працездатність самохідної платформи під навантаженням до 400 кг. Реальна сила опору кочення на сухому ґрунті становила 210–240 Н, що відрізняється від теорії не більше ніж на 5 %. На вологому ґрунті опір зростав до 370–420 Н.

Буксування залишалось незначним ($\delta \leq 0,04$) при навантаженні 200–300 кг і досягало $\delta = 0,08\text{--}0,11$ при повному завантаженні на вологому ґрунті. Споживана потужність одного мотор-колеса становила 90–110 Вт без вантажу та 260–310 Вт при перевезенні 400 кг, а пікові значення не перевищили 420 Вт, що підтверджує правильність вибору мотор-колеса.

Побудована математична модель питомих енерговитрат виявилася адекватною та показала, що на енергоефективність найбільше впливають швидкість руху та маса вантажу, а оптимальний тиск у шинах знаходиться в середньому діапазоні. Найменші питомі енерговитрати досягаються при швидкості 2,0–2,5 м/с, тиску 0,10–0,13 МПа та вантажі 300–400 кг.

Отримані результати дозволяють обґрунтувати раціональні режими роботи платформи та використовувати їх при плануванні логістичних операцій у мостовій технології.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

5.1 Загальні положення та нормативна база

Організація безпечної експлуатації самохідної платформи для перевезення вантажів у технологічних коридорах мостової системи землеробства базується на комплексному дотриманні законодавчих, нормативних та галузевих вимог у сфері охорони праці, електробезпеки, машинобудування та цивільного захисту. Забезпечення безпечних умов роботи є ключовим елементом експлуатації сільськогосподарської техніки, оскільки вона функціонує у відкритому середовищі, зазнає впливу змінних метеорологічних факторів і працює поблизу людей.

Усі заходи щодо охорони праці при конструюванні і застосуванні самохідної платформи спрямовані на запобігання виробничому травматизму, зниження техногенного ризику, а також на створення надійної системи управління небезпеками. Важливо, що платформа містить електромеханічні системи, електроприводи, акумуляторне живлення та елементи автоматичного керування, що підвищує вимоги до організації безпечних умов праці, технічного обслуговування та моніторингу її роботи [31].

Нормативно-правова база. До основних нормативних документів, на які спирається система охорони праці під час експлуатації самохідної електромеханічної платформи, належать:

Закон України «Про охорону праці». Визначає основні принципи організації безпечних умов праці, обов'язки роботодавця та працівника, порядок навчання з охорони праці, вимоги щодо технічного стану машин і обладнання. Закон встановлює необхідність проведення інструктажів, перевірки знань операторів та обов'язкових медичних оглядів.

НПАОП 0.00-1.28-10 «Правила охорони праці під час експлуатації сільськогосподарської техніки» [33]. Документ містить вимоги до конструкції та експлуатації машин, зокрема тракторів, самохідних шасі та мобільних механізмів. Хоча платформа є спеціалізованим електрифікованим транспортним засобом, її роботу класифікують як роботу сільськогосподарської техніки. Норматив встановлює вимоги до безпеки робочих зон, огороження рухомих частин, сигналізації, засобів контролю та організації місця роботи оператора.

НПАОП 40.1-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів» [32]. Оскільки платформа працює на електричній тязі та містить високоструміві кола 24В/220В, під час обслуговування необхідно дотримуватись вимог електробезпеки. Документ регламентує порядок виконання робіт в електроустановках, вимоги до засобів захисту, класифікацію приміщень та робочих умов, необхідність захисту від ураження електричним струмом, коротких замикань та перенапруг.

ДСТУ EN ISO 13849-1 «Безпека машин. Частина системи керування». Стандарт визначає вимоги до рівня безпеки систем керування, включно з електронними, гідравлічними та програмними компонентами. На його основі проектується система безпеки платформи: обмеження швидкості, функції екстреної зупинки, блокування запуску, системи діагностики і контролю навантаження.

Відповідність вимогам ISO 13849-1 забезпечує необхідний рівень відмовостійкості та запобігає аварійним ситуаціям у разі збоїв у роботі.

Роль охорони праці при проектуванні платформи. При створенні самохідної платформи основна увага приділяється тому, щоб усі елементи конструкції спочатку відповідали принципам безпечного проектування:

- усі обертові частини (мотор-колеса, редуктори, шарніри поворотних механізмів) повинні мати захисні кожухи;
- силові кабелі повинні бути захищені від пошкоджень та дії вологи;
- акумуляторна батарея розміщується в закритому відсіку з вентиляцією;

- керування платформою повинно мати механізми блокування та аварійної зупинки;
- конструкція має запобігати можливості наїзду на оператора або сторонніх осіб.

Безпечність конструкції визначає рівень ризику не лише для персоналу, а й для технологічного процесу, адже платформа працює безпосередньо на посівах, у зонах підвищеної відповідальності.

Принципи організації безпечної роботи:

Створення системи безпеки експлуатації базується на таких принципах:

Превентивність. Запобігання небезпечним подіям через попередній аналіз ризиків, технічне регулювання та контроль стану обладнання.

Комплексність. Поєднання технічних, організаційних, санітарно-гігієнічних, навчальних та експлуатаційних методів управління ризиками.

Технічна надійність. Конструкція платформи повинна забезпечувати безвідмовну та прогнозовану роботу у змінних польових умовах, включаючи вологість ґрунту, нерівність поверхні та зміну навантажень.

Автоматичний контроль параметрів. Використання електронних сенсорів дозволяє формувати систему ранньої діагностики (перевантаження двигунів, перегрів акумулятора, втрати зчеплення, критичні нахили).

Мінімізація впливу людського фактору. Чіткі інструкції з експлуатації, індивідуальне навчання операторів та система попереджувальних сигналів зменшують імовірність помилок.

Основна мета розділу є формування чіткої системи вимог і регламентів, що гарантують:

- мінімізацію ризику травматизму операторів;
- безпечну експлуатацію електроприводу та акумуляторного обладнання;
- попередження аварійних ситуацій під час польових робіт;
- відповідність платформи чинним технічним і правовим нормам;

- забезпечення безперервного, стабільного та безпечного транспортування продукції в умовах мостової технології землеробства.

Розроблена нормативна база є фундаментом для подальших розділів з аналізу небезпек, оцінки ризиків та проектування спеціальних заходів захисту під час експлуатації самохідної платформи.

5.2 Виробничі небезпеки та фактори ризику

Під час експлуатації самохідної платформи працівник може піддаватися впливу таких небезпек:

Механічні небезпеки

- можливість наїзду на оператора під час маневрування;
- защемлення кінцівок у зоні поворотних механізмів і мотор-коліс;
- перекидання під час руху по нерівному рельєфу;
- падіння вантажу з кузова при перевантаженні.

Електричні небезпеки

- ураження електричним струмом при роботі з бортовою мережею 24 В;
- коротке замикання або пошкодження ізоляції високострумівих кабелів мотор-коліс;
- помилки під час заряджання акумуляторної батареї.

Ергономічні та мікрокліматичні фактори

- тривала робота на відкритому повітрі під дією сонячного опромінення;
- підвищене фізичне навантаження при ручному завантаженні/розвантаженні платформи.

Пожежовибухові ризики

- можливість займання кабелів при замиканні;
- перегрів тягової батареї під час роботи у пікових режимах;
- займання сухої рослинності під впливом іскріння електричних контактів.

5.3 Заходи забезпечення безпеки під час експлуатації платформи

Безпечна експлуатація самохідної електромеханічної платформи у мостовій системі землеробства передбачає комплекс технічних, організаційних і профілактичних заходів, які спрямовані на зниження ризиків для персоналу, попередження аварійної зупинки та запобігання травмуванню. Конструкція платформи характеризується наявністю електроприводів, рухомих механічних вузлів, акумуляторного блока та системи автоматичного керування, що вимагає підвищеної уваги до питань електро- та механічної безпеки, а також дотримання правил пожежної та техногенної безпеки.

Загальні вимоги охоплюють створення технічно справного середовища роботи платформи, належну підготовку персоналу та впровадження системи контролю ризиків у реальному часі. Подані нижче заходи є обов'язковими при експлуатації обладнання у відкритих польових умовах, у зоні розміщення посівів та на технологічних доріжках.

5.3.1 Електричний захист

У конструкції використовується автономна електросистема живлення з робочою напругою 24 В, але наявність високих струмів та силових акумуляторів створює потенційну небезпеку короткого замикання, перегріву або ураження електричним струмом під час обслуговування. Тому передбачені такі технічні заходи:

- Заземлення металевих частин рами та кузова. Навіть при низькій робочій напрузі рама платформи виконується з можливістю підключення до контуру заземлення під час ремонту чи заряджання від стаціонарних станцій.

- Захист ланцюгів живлення здійснюється через автоматичні вимикачі, запобіжники та електронні модулі моніторингу, які відключають привід у разі короткого замикання.
- Моніторинг струму мотор-коліс. Бортова система фіксує реальні значення сили струму та формує аварійне повідомлення при перевищенні номінальних режимів.
- Захист акумуляторної батареї. Передбачена система балансування елементів, температурні датчики та аварійне відключення при перегріві. Застосування цих заходів мінімізує ризики займання, виходу з ладу електроприводу та ураження електрикою під час робіт.

5.3.2 Механічний захист

Платформа має ряд рухомих елементів – мотор-колеса, поворотні серводвигуни, карданні шарніри та редукторні механізми. Для запобігання травмуванню розроблені такі заходи:

- Огородження небезпечних зон. Редуктори, обертові вали та кріплення поворотних вузлів закриті металевими та полімерними кожухами.
- Захист кузова від розсипання вантажу. Встановлюються бортові борти та фіксатори, які запобігають падінню продукції під час руху по нерівному ґрунту.
- Механічні упори для коліс при технічному обслуговуванні запобігають мимовільному руху платформи.
- Заборона доступу сторонніх осіб у зону повороту коліс під час пуску приводу, оскільки зміна траєкторії може стати несподіваною.

Завдяки таким заходам виключається можливість затягування одягу, защемлення кінцівок або падіння вантажу.

5.3.3 Заходи системи керування і програмного обмеження

Система безпечного керування

Електронна система управління виконує постійний контроль за режимами роботи приводу та забезпечує автоматичне обмеження небезпечних параметрів:

- Екстрена кнопка STOP розміщується на доступній стороні рами та миттєво відключає живлення тягових мотор-колiс.
- Обмеження швидкостi руху. У вантажному режимi встановлено максимальну швидкiсть 3 м/с; при поворотi швидкiсть автоматично знижується.
- Блокування запуску при незачиненому акумуляторному вiдсiку, вiдсутностi фiксацiї борту або перевантаженнi платформи.
- Контроль зчеплення з ґрунтом. У випадку втрати зчеплення система зменшує напругу живлення i вiдновлює нормальний режим пiсля стабiлiзацiї руху.
- Захист вiд перекидання. Гiроскопiчний датчик блокує рух при надмiрному ухилi.

Такi функцiї гарантують, що платформа не створить аварiйних ситуацiй у роботi персоналу та навколишнього обладнання.

5.3.4 Заходи пожежної безпеки

Акумуляторнi системи та електроприводи пiдвищують ризик теплових аварiй. Для запобiгання можливим пожежам передбачено:

- Негорючi кабельнi канали та матерiали класу НГ у зонi розмiщення акумулятора.
- Вентиляцiйнi отвори в акумуляторному вiдсiку для вiдведення тепла та газiв.
- Порошковий вогнегасник ВП-2, закрiплений на рами платформи.

- Заборона роботи біля відкритого полум'я, теплових гармат, сушильних установок.
- Регулярний огляд контактних груп, щоб уникнути нагару та іскріння. Застосування цих засобів запобігає можливим займанням під час тривалого транспортування або високих навантажень на привід.

5.3.5 Організаційні заходи

Вимоги до персоналу

Для роботи з платформою допускаються лише особи:

- які пройшли інструктаж з охорони праці;
- мають знання правил експлуатації сільськогосподарської техніки;
- пройшли навчання з електробезпеки (І група);
- ознайомлені з інструкцією експлуатації конкретної моделі.

Перед початком роботи працівник зобов'язаний:

- оглянути стан рами, коліс, електропроводки;
- перевірити рівень заряду акумулятора;
- протестувати аварійну зупинку;
- розчистити зону руху платформи від сторонніх предметів.

Організація робочої зони

- Платформа повинна рухатись лише технологічними доріжками.
- Заборонено перебування людей між платформою та рослинами у зоні її руху.
- Робоча зона має бути рівною, очищеною від великих каменів та колод.
- У нічний час використовується додаткове освітлення.

Моніторинг технічного стану

Для запобігання аварійним ситуаціям впроваджується регулярний контроль вузлів:

- огляд мотор-колів на предмет механічних пошкоджень;

- перевірка нагріву редукторів після роботи;
- контроль затяжки кріплень рами;
- вимірювання опору ізоляції кабелів;
- перевірка рівня напруги кожного акумуляторного модуля.

Технічне обслуговування виконується не рідше ніж 1 раз на 50 годин роботи.

- при появі запаху гару – зупинити платформу та вимкнути живлення;
- при сторонньому шумі або вібраціях – негайно припинити рух;
- при нерівномірному навантаженні платформи – відрегулювати розміщення вантажу;
- при русі під дощем – знизити швидкість та уникати глибоких калюж;
- при перегріві електроприводу – дати йому охолонути в тіні.

Ці правила дозволяють уникати травмування персоналу та передчасного зносу обладнання.

Реалізація наведених технічних та організаційних заходів дає змогу створити безпечні умови експлуатації самохідної платформи, знизити рівень виробничих ризиків і забезпечити стабільність логістичних операцій у мостовій технології. Дотримання вимог охорони праці сприяє довговічності обладнання, зменшує ризик аварій та гарантує безпеку персоналу під час виконання польових робіт.

5.4 Інструкція з охорони праці при експлуатації самохідної платформи для перевезення вантажів

1. Загальні положення

1.1. Інструкція встановлює вимоги з охорони праці під час експлуатації самохідної електромеханічної платформи, що використовується для перевезення вантажів у системі мостового землеробства.

1.2. До керування платформою допускаються особи не молодше 18 років, які:

- пройшли навчання та первинний інструктаж з охорони праці;
- ознайомлені з правилами експлуатації платформи;
- мають групу допуску з електробезпеки не нижче I

1.3. Під час роботи працівник повинен дотримуватися вимог Закону України «Про охорону праці», ПБЕЕС, НПАОП 0.00-1.28-10 та внутрішніх регламентів підприємства.

1.4. Платформа працює від автономного джерела живлення. Наявність високих струмів у силових колах створює додаткові ризики перегріву, займання та механічного травмування.

1.5. Працівник зобов'язаний негайно повідомити керівника про будь-яку несправність, сторонні шуми, підвищений нагрів електродвигунів або пошкодження проводки.

2. Вимоги безпеки перед початком роботи

2.1. Перед запуском платформи необхідно виконати зовнішній огляд:

- переконатися у відсутності тріщин, пошкоджень рами та коліс;
- перевірити цілісність кабелів та контактів акумуляторної батареї;
- оглянути кріплення вантажу в кузові.

2.2. Перевірити рівень заряду акумуляторів та стан індикаторів на панелі керування.

2.3. Упевнитися, що на платформі та поблизу немає сторонніх осіб, особливо в зоні повороту коліс.

2.4. Перевірити роботу кнопки аварійного вимкнення (STOP).

2.5. Переконатися, що технологічна доріжка чиста, рівна, без глибоких ям, великих каменів чи сторонніх предметів.

2.6. Забороняється працювати в умовах дощу, грози, туману або недостатньої видимості без додаткового освітлення.

2.7. Навантаження в кузов має розподілятися рівномірно; не допускається перевищувати номінальну масу вантажу 400 кг.

3. Вимоги безпеки під час роботи

3.1. Керування платформою здійснюється лише з безпечної зони та за допомогою штатного пульта керування або бортового модуля.

3.2. Забороняється знаходитися між платформою та конструкційними елементами агромоста, рослинами або іншими перешкодами.

3.3. Під час руху забороняється:

- торкатися обертових частин та підлазити під платформу;
- різко змінювати напрямок руху або виконувати маневри з високою швидкістю;
- перевозити людей або стояти на платформі.

3.4. У разі появи ознак буксування необхідно знизити швидкість або припинити рух до стабілізації коліс.

3.5. При роботі у вантажному режимі максимальна швидкість не повинна перевищувати 3 м/с.

3.6. У разі спрацювання захисту електроприводу (перевищення струму, перегрів, падіння напруги) платформу слід зупинити та усунути причину.

3.7. Забороняється працювати з відкритим акумуляторним відсіком або пошкодженими кожухами редукторів.

3.8. У разі задимлення чи запаху гару негайно:

- зупинити платформу;
- натиснути кнопку STOP;
- вимкнути головний вимикач;
- застосувати порошковий вогнегасник ВП-2 (за необхідності).

4. Вимоги безпеки після закінчення роботи

- 4.1. Зупинити платформу, вимкнути живлення, встановити фіксуючі упори під колеса.
- 4.2. Перевірити температуру мотор-коліс та акумуляторів – не допускається перегрів понад допустиму норму.
- 4.3. Вийняти ключ керування або заблокувати доступ до пульта для сторонніх осіб.
- 4.4. Очистити платформу від рослинних решток, ґрунту, пилу та вологи.
- 4.5. Виконати візуальний контроль проводки, кріплень і шин після роботи.
- 4.6. У разі виявлення несправностей зробити запис у журналі технічного обслуговування.

5. Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

- 5.1. У разі короткого замикання, задимлення або іскріння негайно натиснути STOP та відключити головний вимикач живлення.
- 5.2. При виникненні пожежі використовувати лише порошковий вогнегасник. Гасіння водою категорично заборонено.
- 5.3. У разі перекидання вантажу – зупинити платформу, перекрити живлення, зняти навантаження після повної стабілізації.
- 5.4. В разі втрати керування необхідно перейти на аварійний режим – зупинка платформи з автоматичним блокуванням мотор-коліс.
- 5.5. При отриманні травми працівника негайно викликати швидку допомогу, повідомити керівництво та забезпечити першу домедичну допомогу.

6. Заключні положення

- 6.1. Працівник, який порушує вимоги цієї інструкції, несе відповідальність згідно з чинним законодавством.
- 6.2. Інструкція підлягає перегляду кожні 3 роки або у разі зміни конструкції платформи, технологічних умов чи законодавчих вимог.

6.3. Виконання вимог цієї інструкції забезпечує безпечну, надійну та ефективну експлуатацію самохідної платформи у мостовій системі землеробства.

5.5 Безпека в надзвичайних ситуаціях

Дії у разі пожежі

- негайно натиснути кнопку аварійного зупинення;
- від'єднати живлення акумулятора;
- застосувати порошковий вогнегасник;
- у разі поширення полум'я – викликати ДСНС (101).

Дії під час короткого замикання

- вимкнути живлення;
- не торкатись оголених кабелів;
- перевірити ізоляцію та замінити пошкоджені елементи.

Дії при перекиданні платформи

- знеструмити платформу;
- оцінити стан оператора, за потреби надати першу допомогу;
- не намагатися піднімати платформу самостійно – лише за допомогою іншого механізму.

5.6 Висновки

Запропонована система заходів охорони праці забезпечує безпечну експлуатацію самохідної платформи в умовах польових робіт. Аналіз небезпечних факторів дозволив сформувавши комплекс технічних та організаційних рішень, що мінімізують ризики механічних травм, ураження електричним струмом, перегріву обладнання та виникнення пожежі. Виконання вимог нормативних документів гарантує надійну та безпечну роботу платформи як під час транспортування вантажів, так і при взаємодії з іншими елементами мостової технології землеробства.

6 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ РОЗРАХУНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ САМОХІДНОЇ ПЛАТФОРМИ

6.1 Вихідні припущення для розрахунків

Для порівняння розглядаємо два варіанти логістичного забезпечення мостової технології на полі площею 20 га [34]:

1. Варіант 1 – самохідна електрична платформа вантажопідйомністю 400 кг.
2. Варіант 2 – мінітрактор із причепом вантажопідйомністю до 500 кг.

Приймаємо такі вихідні дані:

- тривалість роботи за сезон – 120 змін (днів) по 8 годин;
- платформа працює у межах координатно-транспортної системи, мінітрактор – по тій же доріжці, але з більшими витратами пального;
- розрахунок ведемо на один сезон експлуатації.

6.2 Витрати для самохідної платформи

Амортизаційні відрахування

Вартість платформи (рама, мотор-колеса, акумулятори, сервоприводи, вантажний модуль, система керування):

$$C_{пл} = 320\,000 \text{ грн}$$

Нормативний строк служби для інтенсивної експлуатації (з урахуванням ресурсу акумуляторів) приймаємо:

$$T_{пл} = 5 \text{ років}$$

Річна сума амортизації (прямолінійний метод):

$$A_{пл} = \frac{C_{пл}}{T_{пл}} = \frac{320\,000}{8} = 40\,000 \text{ грн/рік} \quad (6.1)$$

Витрати електроенергії

Середня споживана потужність у русі (з урахуванням ККД приводу):

$$N = 1,8 \text{ кВт} \cdot \text{бар}$$

Тривалість роботи за зміну:

$$t_{зм} = 8 \text{ год}$$

Енергія на одну зміну:

$$E_{зм} = N \cdot t_{зм} = 1,8 \cdot 8 = 14,4 \text{ кВт} \quad (6.2)$$

Тариф на електроенергію для підприємства приймемо орієнтовно:

$$C_e = 10 \text{ грн/кВт}$$

Вартість електроенергії за зміну:

$$C_{e, зм} = E_{зм} \cdot C_e = 14,4 \cdot 10 = 144 \text{ грн} \quad (6.3)$$

За сезон (120 змін):

$$C_{e, сез} = C_{e, зм} \cdot 120 = 144 \cdot 120 = 17280 \text{ грн} \quad (6.4)$$

Технічне обслуговування та ремонт

Для електромеханічної платформи ТО і ремонт оцінюємо в межах 5 % від її вартості на рік:

$$C_{ТО, пл} = 0,05 \cdot C_{пл} = 0,05 \cdot 320\,000 = 16\,000 \text{ грн/рік} \quad (6.5)$$

Сюди входять: огляд і підтягування кріплень, заміна мастил у редукторах, дрібний ремонт, діагностика електроніки, сервіс акумуляторів.

Заробітна плата

Самохідна платформа працює у напівавтоматичному режимі та не потребує окремого тракториста. Оператор лише контролює роботу платформи та виконує завантаження/розвантаження:

$$C_{\text{зарп, пл}} = C_{\text{зм, пл}} \cdot C_e = 600 \cdot 120 = 72000 \text{ грн/сезон} \quad (6.6)$$

де $C_{\text{зм, пл}}$ – оплата за зміну, $C_{\text{зм}} = 600$ грн/зм.

Інші експлуатаційні витрати

До них належать: дрібні матеріали, очищення, змащувальні матеріали, періодична калібровка датчиків тощо. Прийmemo:

$$C_{\text{інш, пл}} = 2000 \text{ грн/рік}$$

Загальна сума витрат для платформи за сезон

$$C_{\text{пл, заг}} = A_{\text{пл}} + C_e, \text{ сез} + C_{\text{ТО, пл}} + C_{\text{зарп, пл}} + C_{\text{інш, пл}} \quad (6.7)$$

$$C_{\text{пл, заг}} = 40000 + 17280 + 16000 + 72000 + 2000 = 147280 \text{ грн/сезон}$$

6.3 Витрати для мінітрактора з причепом

Амортизаційні відрахування

Орієнтовна вартість комплексу трактор+причеп:

Мінітрактор 24 к.с. LOVOL WL244HRX

$$C_{\text{тр}} = 380000 \text{ грн}$$

Причеп

$$C_{\text{пр}} = 70000 \text{ грн}$$

Сумарна вартість:

$$C_{\text{мт}} = C_{\text{тр}} + C_{\text{пр}} = 380000 + 70000 = 450000 \text{ грн} \quad (6.8)$$

Нормативний строк служби:

$$T_{\text{мт}} = 8 \text{ років}$$

Річна амортизація:

$$A_{MT} = \frac{C_{MT}}{T_{MT}} = \frac{450\,000}{8} = 56\,250 \text{ грн/рік} \quad (6.9)$$

Витрати пального

Середня годинна витрата дизпалива для мінітрактора 24 к.с. при роботі з причепом:

$$qh \approx 2,8 \text{ л/год}$$

Тривалість зміни:

$$t_{зм} = 8 \text{ год}$$

Витрата пального за зміну:

$$Q_{зм} = qh \cdot t_{зм} = 2,8 \cdot 8 = 22,4 \text{ л} \quad (6.10)$$

Ціна дизпалива:

$$C_d = 55 \text{ грн/л}$$

Вартість пального за зміну:

$$C_{d, зм} = Q_{зм} \cdot C_d = 22,4 \cdot 55 = 1\,232 \text{ грн} \quad (6.11)$$

За сезон (120 змін):

$$C_{d, сез} = C_{d, зм} \cdot 120 = 1\,232 \cdot 120 = 147\,840 \text{ грн} \quad (6.12)$$

Технічне обслуговування та ремонт

Для тракторної техніки витрати на ТО і ремонт зазвичай складають 8 % від її балансової вартості на рік:

$$C_{ТО, MT} = 0,08 \cdot C_{MT} = 0,08 \cdot 450\,000 = 36\,000 \text{ грн/рік} \quad (6.13)$$

Заробітна плата тракториста

Для роботи мінітрактора потрібен кваліфікований тракторист.

Приймемо денну оплату праці:

$$C_{\text{дн}} = 800 \text{ грн/зміну}$$

За сезон (120 змін):

$$C_{\text{зарп, мт}} = C_{\text{дн}} \cdot 120 = 800 \cdot 120 = 96\,000 \text{ грн} \quad (6.14)$$

Інші експлуатаційні витрати

Сюди входять мастила, фільтри, дрібний ремонт причепа, податки на паливо тощо. Оцінимо їх на рівні:

$$C_{\text{інш, мт}} = 5\,000 \text{ грн/рік}$$

Загальна сума витрат для мінітрактора за сезон

$$C_{\text{мт, заг}} = A_{\text{мт}} + C_{d, \text{сез}} + C_{\text{ТО, мт}} + C_{\text{зарп, мт}} + C_{\text{інш, мт}} \quad (6.15)$$

$$C_{\text{мт, заг}} = 56\,250 + 147\,840 + 36\,000 + 96\,000 + 5\,000 = 341\,090 \text{ грн/сезон}$$

Річна економія від застосування самохідної платформи:

$$\Delta C = C_{\text{мт, заг}} - C_{\text{пл, заг}} = 341\,090 - 147\,280 = 253\,900 \text{ грн/сезон}$$

Орієнтовний строк простої окупності платформи:

$$T_{\text{окуп}} = \frac{C_{\text{пл}}}{\Delta C} = \frac{320\,000}{193\,810} = 1,65 \text{ року}$$

Результати розрахунку зведемо в таблицю 6.1

Таблиця 6.1 – Результати техніко-економічного розрахунку

Стаття витрат	Самохідна платформа	Мінітрактор LOVOL WL244HRX + причіп	Різниця (мінітрактор – платформа), грн
Початкова вартість обладнання, грн	320 000	450 000	130 000
Операція	Перевезення вантажів масою до 400 кг	Перевезення вантажів масою до 400 кг	-
Нормативне завантаження, год/сезон	960	960	-
Нормативний строк служби, років	8	8	–
Амортизація за сезон, грн/сезон	40 000	56 250	16 250
Енергоносій (електроенергія / дизпаливо), грн/сезон	17 280	147 840	130 560
ТО і ремонт, грн/сезон	16 000	36 000	20 000
Зарплата оператора / тракториста, грн/сезон	72 000	96 000	24 000
Інші експлуатаційні витрати, грн/сезон	2 000	5 000	3 000
Загальні витрати за сезон, грн/сезон	147 280	341 090	193 810
Річна економія від платформи, грн/сезон	193 810		
Орієнтовний строк окупності, років	1,65		

6.4 Висновки

Порівняльний аналіз показав, що експлуатація самохідної електричної платформи є економічно вигіднішою у порівнянні з мінітрактором із причепом такої ж вантажопідйомності. Загальні сезонні витрати на платформу становлять 147,28 тис. грн, що на 193,81 тис. грн менше, ніж витрати на експлуатацію мінітрактора. Основними чинниками економії є низька вартість електроенергії, зменшені витрати на технічне обслуговування та відсутність потреби у висококваліфікованому трактористі. Річна економія понад 250 тис. грн забезпечує швидку окупність платформи 1,6 року. Отже, використання електричної самохідної платформи є доцільним та ефективним рішенням для логістичного забезпечення мостової технології в овочівництві.

ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

1. Випускна кваліфікаційна робота присвячена підвищенню ефективності мостової технології точного землеробства шляхом розробки самохідної колісної платформи для внутрішньопольових транспортно-перевалочних операцій. Проведені теоретичні, конструктивні та експериментальні дослідження дозволили всебічно оцінити технічні можливості нової платформи, визначити закономірності її функціонування в умовах координатно-транспортної системи та обґрунтувати доцільність її практичного застосування в овочівництві.

2. У роботі доведено, що внутрішньопольова логістика є однією з найбільш трудомістких і ресурсоемних ланок у технології вирощування овочевих культур, а традиційні транспортні засоби (тракторні причепа, мінітехніка) не відповідають вимогам мостової технології через надмірну масу, невідповідні габарити та високий рівень ущільнення ґрунту.

3. На основі аналізу сучасних технічних засобів у світі та в Україні сформовано науково-технічні передумови для створення нової конструкції платформи для перевезення вантажів. Розроблена конструктивна схема передбачає застосування шести мотор-колес, тривісної опорно-поворотної системи і модульної рами, що забезпечує достатню вантажопідйомність (до 400 кг), маневровість у вузьких технологічних коридорах, рівномірний розподіл навантаження та мінімальний вплив на ґрунт. Перевагою запропонованої конструкції є її узгодженість з габаритними та швидкісними параметрами агропосту, що забезпечує сумісність платформ із мостовою машиною у спільному циклі виконання робіт.

4. Теоретична частина роботи включала розрахунки моментів на осях повороту колес, визначення сил опору кочення, оцінку енергетичних параметрів приводу та аналіз кінематичних особливостей незалежного керування колесами. Розрахунки показали, що основним фактором зростання опору є глибина колії, тоді як буксування та вертикальне навантаження мають менший вплив. Це

підтвердило доцільність використання шин низького тиску та рівномірного розподілу маси по базі платформи. Потреба в потужності була оцінена на рівні ≈ 2 кВт, що дозволило застосувати серійні мотор-колеса потужністю 350 Вт із достатнім запасом тягових характеристик.

Міцнісний аналіз рами та вузлів кріплення показав, що застосування профільної труби $60 \times 30 \times 3$ мм забезпечує запас міцності близько 1,7 при максимальних напруженнях до 95 МПа, що є безпечним рівнем для конструкцій цього класу. Це дозволяє платформі працювати з номінальними вантажами без ризику деформацій та небезпечних напружень.

5. Експериментальні дослідження підтвердили високу відповідність теоретичних моделей реальним умовам експлуатації. Сила опору кочення на ущільненому сухому ґрунті становила 210–240 Н, що практично збігається з теоретичними розрахунками (≈ 227 Н). Буксування залишалось незначним у широкому діапазоні навантажень, а споживана потужність одного мотор-колеса не перевищувала 260–310 Вт у номінальних режимах. Багатофакторний експеримент дозволив встановити оптимальні режими роботи: швидкість 2,0–2,5 м/с, тиск у шинах 0,10–0,13 МПа та маса вантажу 300–400 кг, при яких платформа демонструє мінімальні питомі енерговитрати.

6. Економічні розрахунки засвідчили значну ефективність запропонованої платформи порівняно з мінітехнікою такої ж вантажопідйомності. Окупність роботи становить 1,65 року.

Таким чином, у роботі повністю вирішено поставлені наукові та практичні завдання. Розроблена самохідна колісна платформа є ефективним, енергоощадним та технологічно доцільним елементом мостової системи точного землеробства.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Gasso, V., Sørensen, C. A. G., Oudshoorn, F. W., & Green, O. (2013). Controlled traffic farming: A review of the environmental impacts. *Soil and Tillage Research*, 132, 69–78. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.05.001>
2. Улексін, В.І. Мостові машини в точному землеробстві: стан і перспективи розвитку // Вісник аграрної науки Південного регіону, 2022. – №3. – С. 42–49.
3. Шрамко О.В., Інноваційні транспортні системи в овочівництві України // Науковий вісник НЛТУ. – 2014. – №2(67). – С. 85–91.
4. Materiel Agricole Info. (2024). La fin du tracteur en maraîchage ? Le concept EOLE Tract. Retrieved from <https://www.materielagricole.info/tracteur/article/713859/la-fin-du-tracteur-en-maraichage>
5. NEXAT AG. (2024). The NEXAT System – All-in-One Modular Platform. <https://www.nexat.de/en/the-system>
6. Мостове землеробство. Елементи теорії та результати досліджень: Монографія [Кобець А.С., Теслюк Г.В., Пугач А.М., Надикто В.Т., Улексін В.О. Бойко В.Б., Теслюк Ю.В., Золотовська О.В.]. – Дніпро: ТОВ «Акцент ПП», 2022. – 340 с.
7. Адамчук В.В., Булгаков, В.М., Кувачов В.П. Дослідження автоматичного водіння мобільного мостового агрозасобу по слідах постійної технологічної колії. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2020. Вип. 11(110). С. 12–26.
8. Коцюбенко М.Д. (2024). Підвищення ефективності вирощування сільськогосподарських культур шляхом впровадження мостової технології землеробства: кваліфікаційна робота магістра. – Дніпровський державний аграрно-економічний університет, 75 с.

9. Ahamed, T., Tian, L., Zhang, Y., & Ting, K. C. (2021). Agricultural logistics and supply chain management for precision agriculture. *Agricultural Systems*, 191, 103172. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2021.103172>
10. Sørensen, C. A. G., Bochtis, D. D., Busato, P., & Basso, B. (2010). Workability and logistics in field operations: Modelling and analysis. *Biosystems Engineering*, 106(4), 351–360. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2010.04.001>
11. Agricultural mechanization development. (2023). ResearchGate. Retrieved from. <https://www.researchgate.net/publication/375422997>
[Agricultural Mechanization Development](#)
12. Hulco Carax. <https://www.hulco.eu/en/all-trailers/multipurpose-trailers-en/carax-go-getter-en/>
13. Mondomacchina. (2024). Darmec Transporter: Versatility and efficiency in harvesting. <https://www.mondomacchina.it/en/darmec-transporter-versatility-and-efficiency-in-harvesting-c1604>
14. Gebbers, R., & Adamchuk, V. I. (2010). Precision Agriculture and Food Security. *Science*, 327(5967), 828–831.
15. Bechar, A., & Vigneault, C. (2017). Agricultural Robots for Field Operations: Concepts and Applications. *Biosystems Engineering*, 149, 94–111.
16. AgXeed AgBot 2.055W3: високоточний сільськогосподарський робот. <https://agtecher.com/uk/product-uk/agxeed-agbot-2-055w3/>
17. Naïo Dino. <https://nl.ducksize.com/product-page/naio-dino>
18. FieldRobotics S.r.l. (2024). TRL Platform – Modular Autonomous Electric Platform for Agriculture. <https://www.fieldrobotics.it>
19. Белоєв І., Кувачов В., Адамчук В., Ружило З. Analytical study of the turns of bridge machines // *Machinery & Energetics*. – Vol. 14, No. 3. – 2023. – С. 9-20. – DOI: 10.31548/machinery/3.2023.09. journals.indexcopernicus.com+2Semantic Scholar+2
20. Bulgakov V., Ivanovs S., Volskyi V., Kuvachov V. Experimental research of agricultural bridge unit in the track and bridge farming system // *AM*. – 2020,

21. Охмат, Петро Корнійович. Основи теорії та розрахунку трактора і автомобіля : курс лекцій для студ. за напрямом підготов. 6.100102 "Процеси, машини та обладнання агропром. вир-ва" : навч. посіб. / Охмат П. К., Мельниченко В. І. ; Дніпропетр. держ. аграр. ун-т, Каф. "Трактори і автомобілі". - Д. : ЕНЕМ, 2013. - 339 с.
22. Охмат П.К., Улексін В.О., Мельниченко В.І. Трактори і автомобілі. Практикум: Навчальний посібник. – Дніпропетровськ:: «ЕНЕМ», 2011. – 156 с.
23. Охмат П.К. Визначення зчіпної ваги та розподіл навантаження по мостах трактора Т-150К при оранці. – К.: Вісник сільськогосподарської науки, 1974, № 3.
24. Бешун О. А., Ачкевич В. І., Чуба С.В. Аналіз напрямків розвитку рушіїв сільськогосподарської техніки. Вісник ТДАТУ. Вип. 18, т. 2. – с. 238-246.
25. Bonhomme, J., Mollon, V. & Bonhomme, J. (2015). A method to determine the rolling resistance coefficient by means of uniaxial testing machines. *Experimental Techniques*, 39 (3), 37–41.
26. Russini, A., Schlosser, J. F. & Farias, M. S. (2018). Estimation of the traction power of agricultural tractors from dynamometric tests. *Cienc. Rural*, 48 (4), 16. doi: 10.1590/0103-8478cr20170532.
27. EHSANI M., GAO Y., EMADI A. *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design*. – 3rd ed. – Boca Raton: CRC Press, 2018. – 537 p.
28. LARMINIE J., LOWRY J. *Electric Vehicle Technology Explained*. – 2nd ed. – Chichester: John Wiley & Sons, 2012. – 344 p.
29. MILLER J. M. *Propulsion Systems for Hybrid Vehicles*. – 2nd ed. – Stevenage: IET, 2010. – 598 p.
30. Пилипчик М.І. Математичне планування багатофакторного експерименту: Навч. посібник / М.І. Пилипчик, М.Д. Кірик, А.С. Григор'єв та ін. – Л.: УкрДЛТУ, 2004. – 54 с.

31. Ткачук К. Н. Основи охорони праці: підручник. / К. Н. Ткачук, М. О. Халімовський, В. В. Зацарний та ін. – К.: Основа, 2006. – 448 с.

32. НПАОП 0.00-1.28-10 «Правила охорони праці під час експлуатації сільськогосподарської техніки» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0093-98>

33. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://antifire.ua/dbn/10.pdf>

34. Сичова М.О. Методичні рекомендації по економічному обґрунтуванню диплом-них проектів для студентів факультету механізації сільського господарства, які захищають диплом на кафедрі тракторів і автомобілів [Текст] / Дніпр, держ. агр. ун-т.; уклад. М.О. Сичова, Н.О Шевченко. - Дніпропетровськ: ДДАУ, 2008. -24 с.

ДОДАТКИ

Додаток А
Вихідні дані

№ з/п	Параметр	Позначення	Одиниця	Значення
1	Площа польової ділянки	F	га	20
2	Ширина агротехнічної зони (загінки)	B	м	18
3	Довжина загінки	L	м	400–500
4	Ширина технологічної доріжки для платформи	b _{гд}	м	1,5
5	Кількість технологічних доріжок	n _д	–	За схемою поля
6	Маса самохідної платформи (порожньої)	m	кг	180
7	Максимальна маса вантажу	m _в	кг	400
8	Загальна максимальна маса платформи з вантажем	m _Σ	кг	580
9	Кількість коліс	n _к	шт.	6
10	Радіус колеса	r	м	0,25
11	Ширина шини	b _ш	м	0,20–0,25
12	Внутрішній тиск у шині	p _w	МПа	0,12–0,16

13	Максимальна швидкість руху платформи	V_{\max}	м/с	3
14	Ресурс пробігу за одну зміну	$S_{\text{зм}}$	км	до 20
15	Тип енергетичної установки	–	–	Літій-іонна АКБ
16	Кількість мотор-коліс, що ведуть	–	–	6
17	Прискорення вільного падіння	g	м/с ²	9,81
18	Коефіцієнт зчеплення шини з сухим ґрунтом	φ	–	0,45
19	Орієнтовне навантаження на одне колесо	G_k	Н	948
20	Сила критичного зсуву ґрунту	$F_{\text{кр}}$	Н	427
21	Момент від реакцій ґрунту при повороті колеса	$M_{\text{гр}}$	Н·м	107
22	Сумарний момент опору повороту колеса	$M_{\text{оп}}$	Н·м	123
23	Рекомендований номінальний момент сервопривода	$M_{\text{серво}}$	Н·м	150–160
24	Щільність ґрунту	ρ	кг/м ³	1300–1500
25	Тип ґрунту технологічної доріжки	–	–	Ущільнений ґрунт
26	Тип логістичних операцій	–	–	Насіння, ЗЗР, урожай

Додаток Б
Багатофакторний експеримент

№ дослідю	Швидкість, м/с (x_1)	Тиск, МПа (x_2)	Маса, кг (x_3)	Код, x_1	Код, x_2	Код, x_3	E_{num} , кВт·год/(т·км)
1	1,0	0,08	100	-1	-1	-1	0,42
2	3,0	0,08	100	1	-1	-1	0,3
3	1,0	0,16	100	-1	1	-1	0,36
4	3,0	0,16	100	1	1	-1	0,26
5	1,0	0,08	400	-1	-1	1	0,33
6	3,0	0,08	400	1	-1	1	0,24
7	1,0	0,16	400	-1	1	1	0,28
8	3,0	0,16	400	1	1	1	0,21
9	2,0	0,12	250	0	0	0	0,22