

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет Конструювання та дизайну

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри
Конструювання машин і обладнання
(назва кафедри)

(підпис) Вячеслав ЛОВЕЙКІН
(ПІБ)

“ ____ ” _____ 2026 р.

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ МОБІЛЬНОЇ ПЛАТФОРМИ
ДЛЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ ФРУКТІВ

Спеціальність 133 – Галузеве машинобудування
(код і назва)

Гарант освітньої програми

д.т.н., професор
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Володимир БУЛГАКОВ
(ПІБ)

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи

д.т.н., професор
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Вячеслав ЛОВЕЙКІН
(ПІБ)

к.т.н.
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Анастасія ЛЯШКО
(ПІБ)

Виконав

(підпис)

Сачик Денис Сергійович
(ПІБ студента)

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет Конструювання та дизайну

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Конструювання машин і обладнання
Д.Т.Н., професор Вячеслав ЛОВЕЙКІН
(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (ПІБ)
“ ” 2025 р.

З А В Д А Н Н Я

на виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи студенту

Сачика Дениса Сергійовича
(прізвище, ім'я, по батькові)
Спеціальність 133 – Галузеве машинобудування
(код і назва)

Тема бакалаврської кваліфікаційної роботи (дипломного проекту бакалавра) РОЗРОБКА
КОНСТРУКЦІЇ МОБІЛЬНОЇ ПЛАТФОРМИ ДЛЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ
ФРУКТІВ

затверджена наказом ректора НУБіП України від “15” квітня 2026 р. №1044 «С»

Термін подання завершеної роботи (проекту) на кафедру 2026 червня 04
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до бакалаврської кваліфікаційної роботи (дипломного проекту бакалавра)

Технологічна схема застосування мобільної платформи для транспортування фруктів

Перелік питань, які потрібно розробити:

1. Провести аналіз існуючих конструкцій мобільних платформ
2. Розглянути перспективи створення нової конструкції мобільної платформи
3. Виконати розрахунок мобільної платформи
4. Розглянути питання охорони праці при роботі з мобільними платформами
5. Виконати розрахунок економічної ефективності

Перелік графічних документів (за потреби)

1. Загальний вигляд
2. Креслення вузла

Дата видачі завдання “16” квітня 2026 р.

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи

Вячеслав ЛОВЕЙКІН.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Анастасія ЛЯШКО
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання

Денис САЧИК
(підпис) (прізвище та ініціали студента)

ЗМІСТ

ЗМІСТ	3
РЕФЕРАТ	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ	
КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ РОБОТИЗОВАНОЇ МОБІЛЬНОЇ	
ПЛАТФОРМИ ДЛЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ ФРУКТІВ У ЯЩИКАХ	9
1.1.Аналіз сучасного стану автоматизації збору та	
транспортування врожаю	9
1.2.Класифікація та аналіз існуючих конструкцій мобільних	
платформ	13
1.3.Огляд систем навігації та маніпулювання вантажами	17
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ РОБОТИЗОВАНОЇ	
МОБІЛЬНОЇ ПЛАТФОРМИ ДЛЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ ФРУКТІВ.....	23
2.1.Обґрунтування компонування мобільної платформи	23
2.2.Вибір стандартної тари для фруктів	26
2.3.Розрахунок маси вантажу	26
2.4.Визначення максимальної кількості ящиків	27
2.5.Розрахунок загальної маси платформи	27
2.6.Тяговий розрахунок руху по ґрунтовій поверхні	29
2.7.Розрахунок необхідної сили тяги	30
2.8.Розрахунок крутного моменту на колесах та перевірка	
зчеплення	32
2.9.Підбір електродвигунів приводу коліс	33
2.10. Розрахунок редуктора та передавального механізму	34
2.11. Розрахунок енергоспоживання	35

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Сачик Д.С.			ЗМІСТ	Літ.	Арк.
Перевір.		Ляшко А.П.					Акрушів
						3	69
Н. Контр.		Матухно Н.В.				НУБіП України	
Затверд.		Ловейкін В.С.					

2.12. Розрахунок акумуляторної батареї	35
РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ	
МОБІЛЬНОЇ ПЛАТФОРМИ ДЛЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ ФРУКТІВ.....	37
3.1.Аналіз небезпечних і шкідливих факторів при експлуатації мобільної платформи	37
3.2.Заходи з підвищення безпеки роботи мобільної платформи	43
3.3.Вимоги до техніки безпеки під час обслуговування та ремонту	48
РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ	52
4.1.Орієнтовна собівартість розробленої мобільної платформи	52
4.2.Порівняння розробленої платформи з існуючими аналогами на ринку	54
4.3.Оцінка економічної доцільності впровадження	55
ВИСНОВКИ	58
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	60
ДОДАТКИ	69

РЕФЕРАТ

Бакалаврська кваліфікаційна робота складається з пояснювальної записки, що містить вступ, чотири розділи, висновки, список використаних джерел та додатків. Дана робота представлена на ____ аркушах друкованого тексту.

В першому розділі бакалаврської кваліфікаційної роботи розглянуто сучасний стан роботизації в сільському господарстві, проведено класифікацію мобільних платформ для перевезення врожаю, виконано аналіз конструкцій сучасних колісних шасі. Розглянуті конструкції і закордонних аналогів та перспективи створення нових автономних платформ для транспортування фруктів.

В другому розділі роботи проведено розрахунок конструкції мобільної платформи, а саме розраховано її основні параметри (визначено корисне навантаження, виконано тягово-динамічний розрахунок для руху по садовому ґрунту та підібрано електродвигуни з редукторами й акумулятор). Також виконано розрахунок елементів ходової частини та рами на міцність.

В розділі охорона праці розглянуто вимоги безпеки при експлуатації мобільної платформи в саду, аналіз можливих ризиків (наприклад, зіткнення чи перекидання на ухилах) і заходів щодо їхнього мінімізації, правила технічного обслуговування та ремонту.

Також в бакалаврській кваліфікаційній роботі виконано розрахунок економічної ефективності від розробки нової конструкції мобільної платформи для транспортування фруктів, де прораховано собівартість створення прототипу, річну економію та термін окупності проекту.

Ключові слова: мобільна платформа, агроробототехніка, внутрішньосадова логістика, тяговий розрахунок, безколекторний двигун, охорона праці, економічна ефективність.

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Сачик Д.С.			ЗМІСТ	Літ.	Арк.
Перевір.		Ляшко А.П.					Акрушів
							5
Н. Контр.		Матухно Н.В.				НУБіП України	
Затверд.		Ловейкін В.С.					
							69

ВСТУП

Сьогодні садівництво в Україні активно розвивається, адже вирощування фруктів та ягід є дуже перспективною справою для багатьох фермерів. Проте під час масового збору врожаю завжди виникає одна й та сама серйозна проблема — як швидко, вчасно та без втрат перевезти зібрані плоди з саду до складу. Робота вантажників у цей період є фізично важкою та одноманітною, а людей часто просто не вистачає. Тому фермерам доводиться шукати нові технічні рішення, щоб полегшити цей процес і зробити його сучаснішим.

Зазвичай для перевезення ящиків по саду використовують звичайні трактори з причепами (рис.1). Але у них є багато суттєвих мінусів. Трактори витрачають багато дорогого палива, сильно ущільнюють землю своїми великими колесами, що погано впливає на коріння дерев, і часто через свої великі габарити просто не можуть нормально проїхати у вузьких міжряддях, обламуючи гілки з плодами. Крім того, звичайні причепа сильно трясуться на нерівній садовій дорозі. Через цю вібрацію ніжні фрукти (наприклад, яблука чи груші) б'ються в ящиках, втрачають свій товарний вигляд і потім починають швидко гнити, що приносить господарствам великі збитки.

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ВСТУП		
Розроб.	Сачик Д.С.						
Перевір.	Ляшко А.П.						
Н. Контр.	Матухно Н.В.						
Затверд.	Ловейкін В.С.				НУБіП України		
					Літ.	Арк.	Акрушіє
						6	69



Рис. 1. Трактор з причепленими ящиками

Саме тому розробка невеликої, маневреної та автономної мобільної платформи на електричній тязі є дуже важливим завданням. Такий робот може акуратно проїжджати між рядами дерев, перевозити ящики безпосередньо від збирачів і робити це тихо та екологічно. Купувати готові закордонні аналоги для більшості українських господарств занадто дорого, тому самостійне проектування доступної та надійної конструкції є дуже актуальним для нашого агросектору.

Головною ціллю цієї роботи є створення проекту такої мобільної платформи, яка була б простою у виготовленні та ефективною в реальних умовах роботи наших садів. Для цього спочатку було проаналізовано існуючі схожі розробки у світі, щоб обрати найкращий тип колісного шасі та схему керування платформи. Потім виконано повний тяговий розрахунок для руху робота по м'якому садовому ґрунту та на підйомах, що дозволило точно

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ	Арк. 7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підібрати потужність електродвигунів та ємність акумулятора для тривалої роботи протягом усієї зміни. Також проведено розрахунки деталей рами на міцність, щоб конструкція надійно витримувала вагу вантажу і не деформувалася під час руху.

Окрему увагу в роботі приділено питанням охорони праці та безпеки під час експлуатації платформи. Оскільки робот працюватиме поруч із людьми, передбачено спеціальні системи зупинки при виявленні перешкод, автоматичне обмеження швидкості на різних режимах та датчики нахилу, щоб машина не перевернулася на нерівній місцевості. Наприкінці роботи виконано економічні розрахунки, які показують, скільки коштуватиме створення такого прототипу та як швидко він зможе окупитися за рахунок підвищення продуктивності праці та зменшення псування фруктів. Отримані результати мають практичне значення, адже за цими розрахунками фермери або невеликі майстерні зможуть зібрати реальний робочий зразок платформи.

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ РОБОТИЗОВАНОЇ МОБІЛЬНОЇ ПЛАТФОРМИ ДЛЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ ФРУКТІВ У ЯЩИКАХ

1.1. Аналіз сучасного стану автоматизації збору та транспортування врожаю

Сучасний агропромисловий комплекс стикається з безпрецедентними викликами, зумовленими глобальною зміною демографічної ситуації та дефіцитом кваліфікованої робочої сили в сільській місцевості. Машинобудування, як фундаментальна база для створення засобів механізації, переорієнтовується на розробку інтелектуальних автономних систем, здатних замінити людину в найбільш трудомістких операціях [1]. Логістика в межах фруктових садів, зокрема транспортування врожаю від дерева до складських приміщень, є критичною ланкою, що визначає загальну продуктивність і собівартість продукції [3]. Дослідження підтверджують, що витрати на ручну працю при збиранні та переміщенні фруктів можуть досягати значної частки в структурі операційних витрат, що стимулює ринок агроробототехніки до стрімкого зростання [1].

Глобальний ринок роботизованих збирачів та транспортних платформ демонструє стійку тенденцію до розширення. За оцінками галузевих аналітиків, обсяг ринку, що становив близько 955 мільйонів доларів США у 2025 році, зростатиме з середньорічним темпом 6,11%, досягаючи позначки понад 1,4 мільярда доларів до 2032 року [1]. Таке зростання зумовлене не лише економічними чинниками, а й технологічним прогресом у галузі штучного інтелекту, комп'ютерного зору та приводної техніки [4]. Основні гравці ринку, такі як Harvest CROO Robotics (рис.1.1), Saga Robotics (рис.1.2) та John Deere (рис.1.3), активно впроваджують рішення, що базуються на повній автономності та здатності систем працювати в режимі 24/7 [1].

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.021 ПЗ								
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТА ОБґРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ РОБОТИЗОВАНОЇ МОБІЛЬНОЇ ПЛАТФОРМИ ДЛЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ ФРУКТІВ У				Літ.	Арк.	Акрушіє		
Розроб.		Сачик Д.С.										9	69
Перевір.		Ляшко А.П.							НУБіП України				
Н. Контр.		Матухно Н.В.											
Затверд.		Ловейкін В.С.											



Рис. 1.1. Роботизована техніка Harvest CROO Robotics



Рис. 1.2. Роботизована техніка Saga Robotics

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10



Рис. 1.3. Роботизована техніка John Deere

Важливим напрямком є перехід до концепції точного землеробства, де мобільна платформа перестає бути просто транспортним засобом і стає частиною інтегрованої системи управління фермою (FMIS) [2]. Використання IoT-платформ дозволяє фермерам моніторити ефективність роботи роботів, прогнозувати потреби в технічному обслуговуванні та оптимізувати графіки збору врожаю [2]. Особлива увага приділяється збереженню якості плодів. Фрукти, такі як яблука, полуниця та ягоди, мають високу чутливість до механічних пошкоджень [2]. Дослідження показують, що використання роботизованих систем з прецизійним керуванням дозволяє знизити втрати від ударів та вібрацій на 25–30% порівняно з традиційними методами транспортування [2].

Світовий досвід розробки агророботів вказує на зміну парадигми від великих універсальних тракторів до малих і середніх модульних платформ [12]. Компанія Saga Robotics з платформою Thorvald (рис.1.4) продемонструвала переваги модульного підходу, де одна базова конструкція може бути адаптована

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

для обприскування, ультрафіолетової обробки рослин або транспортування вантажів [13]. Такий підхід знижує початкові інвестиційні бар'єри для фермерів та підвищує коефіцієнт використання техніки протягом сезону [1].



Рис. 1.4. Платформа Thorvald компанії Saga Robotics

У таблиці нижче представлено порівняльний аналіз динаміки ринку та ключових факторів впливу на розвиток агроробототехніки в період до 2032 року.

Таблиця 1.1.

Порівняльний аналіз динаміки ринку та ключових факторів впливу на розвиток агроробототехніки в період до 2032 року

Показник/Фактор	Значення/Опис	Вплив на машинобудування
Обсяг ринку (2025)	\$954.99 млн	Збільшення замовлень на проектування нових вузлів

Прогнозований CAGR	6.11%	Необхідність масштабування виробничих ліній
Дефіцит робочої сили	Основний драйвер	Пріоритет на повну автономність (Level 5)
Технологічні бар'єри	Висока вартість LiDAR та АКБ	Розробка бюджетних систем орієнтації та енергозбереження
Ключові регіони	Північна Америка (38%), Європа	Адаптація конструкцій під стандарти різних країн

1.2. Класифікація та аналіз існуючих конструкцій мобільних платформ

Вибір кінематичної схеми та типу рушія є фундаментальним етапом проектування в галузевому машинобудуванні. Для умов фруктових садів, які характеризуються нерівним рельєфом, наявністю схилів, перешкод у вигляді іригаційних систем та гілок, розглядаються різні варіанти ходових систем [4].

1.2.1. Колісні системи та їх конфігурації

Колісні платформи (рис.1.5) залишаються домінуючими завдяки своїй енергоефективності на твердих поверхнях та відносній простоті реалізації приводів [9]. У сучасних розробках перевага надається повнопривідним схемам 4x4 з незалежним керуванням кожним колесом. Робот Burro, наприклад,

використовує 14-дюймові шини з глибоким протектором (R1 lugged tires) для роботи в умовах багна, піску та нерівного ґрунту [12].



Рис. 1.5. Колісна платформа Burro

З точки зору машинобудування, критично важливим є розрахунок тягово-зчіпних властивостей. Коефіцієнт зчеплення колеса з ґрунтом визначає максимальний кут підйому, який може подолати платформа без буксування. Для підвищення стабільності часто застосовується розширення колії або низьке розташування акумуляторних блоків, що зміщує центр мас ближче до осі обертання коліс [12].

1.2.2. Гусеничні системи

Гусеничні рушії (рис.1.6) забезпечують мінімальний питомий тиск на ґрунт, що є критичним для збереження кореневої системи дерев та запобігання ущільненню родючого шару [6]. Вони демонструють найкращу прохідність на перезволожених ґрунтах. Проте, гусеничні системи мають вищий опір повороту та складнішу конструкцію трансмісії [6]. У деяких випадках використовуються

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

компактні гусеничні носії, такі як FAE RCU45, для виконання завдань у важкодоступних зонах [6].



Рис. 1.6. Гусенична система FAE RCU45

1.2.3. Крокуючі та багатоногі роботи

Крокуючі системи, такі як чотириногі роботи, представляють собою авангард інженерної думки в агроробототехніці [24]. Робот Spot від Boston Dynamics (рис.1.7.), адаптований для сільського господарства, здатний пересуватися по схилах до 30 градусів і долати перешкоди, які є нездоланими для колісної техніки [24]. Основною перевагою таких систем є здатність підтримувати стабільне положення корпусу при русі по нерівностях, що мінімізує струшування ящиків з фруктами [24].

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15



Рис. 1.7. Робот Spot від Boston Dynamics

Таблиця 1.2.

Порівняння основних типів рухів за ключовими технічними параметрами

Параметр	Колісний (4x4)	Гусеничний	Крокуючий (Quadruped)
Енергоефективність	Висока (>85%)	Середня (65-75%)	Низька (< 50%)
Питомий тиск на ґрунт	Середній (0,5-1,5 кг/см ²)	Низький (0,1-0,3 кг/см ²)	Дуже низький (дискретний)
Складність кінематики	Низька	Середня	Дуже висока
Максимальна швидкість	до 15 км/год	до 10 км/год	до 6 км/год

Вартість виготовлення	Базова	+30-50% до базової	+200-500% до базової
--------------------------	--------	-----------------------	-------------------------

1.2.4. Підвіска Rocker-Bogie та її застосування

Для подолання значних нерівностей без втрати зчеплення ведучих коліс у конструкціях агророботів часто застосовується підвіска типу Rocker-Bogie (рис. 1.8) [18]. Ця система дозволяє платформі підніматися на перешкоди, висота яких вдвічі перевищує діаметр колеса, при цьому нахил основного корпусу залишається мінімальним [18]. Це критично важливо для транспортування ящиків, оскільки запобігає їх випадінню та зіткненню плодів між собою [11].



Рис. 1.8. Підвіска типу Rocker-Bogie

1.3. Огляд систем навігації та маніпулювання вантажами

Автономна навігація в умовах саду є набагато складнішим завданням, ніж рух по шосе, через неструктурованість середовища, змінні погодні умови та відсутність чіткої дорожньої розмітки [4].

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

1.3.1. Сенсорна підсистема та алгоритми орієнтації

Сучасні роботизовані платформи використовують ієрархічну архітектуру керування, яка поєднує глобальне планування шляху та локальне уникнення перешкод [4]. Для отримання даних про навколишнє середовище застосовуються:

- **LiDAR та 360-градусні камери:** забезпечують побудову щільної хмари точок (point cloud), що дозволяє ідентифікувати стовбури дерев, гілки, іригаційні труби та навіть коробки з бджолами [4].

- **RTK-GPS (рис.1.9):** забезпечує точність позиціонування до 2–5 см, проте її стабільність може знижуватися під густою кроною дерев [4].



Рис. 1.9. Topcon HIPER II RTK GPS

- **Сенсори вібрації та IMU (рис.1.10):** використовуються для моніторингу стабільності платформи в реальному часі. Аналіз частотних спектрів вібрацій (за допомогою швидкого перетворення Фур'є – FFT) дозволяє системі розпізнавати тип ґрунту (пісок, трава, ґравій) та адаптувати

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

швидкість руху для зменшення динамічних навантажень [25].

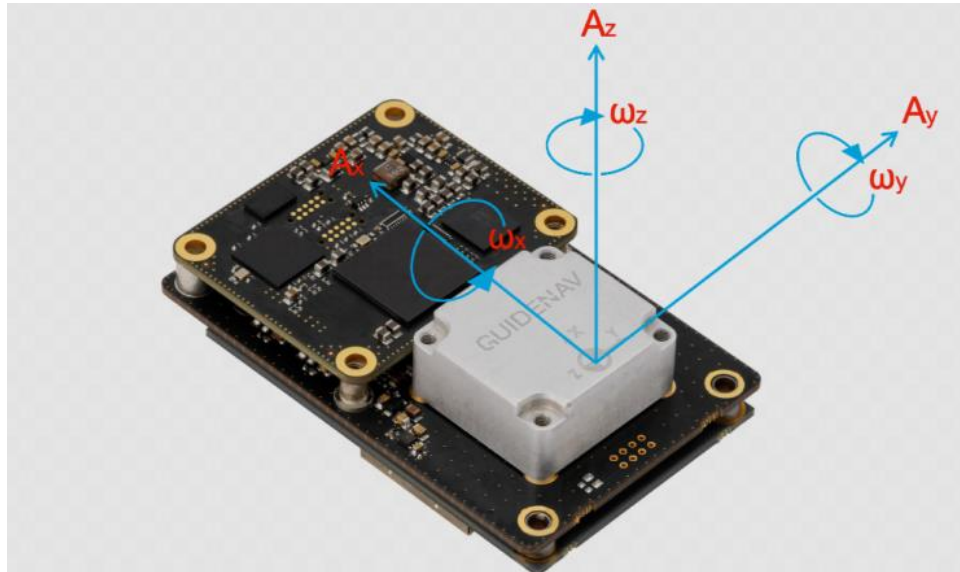


Рис. 1.10. Сенсор IMU від GuideNav

Алгоритми планування, такі як A^* , Hybrid A^* та RRT (Rapidly-exploring Random Tree), використовуються для пошуку оптимальної траєкторії в умовах обмеженого простору міжрядь [4]. Локальне планування часто базується на методі динамічного вікна (DWA), що враховує динаміку робота та обмеження на прискорення [4].

1.3.2. Механізми маніпулювання та фіксації вантажів

Процес навантаження та транспортування ящиків вимагає наявності спеціалізованих виконавчих механізмів. В галузевому машинобудуванні ці механізми мають бути надійними, легкими та стійкими до корозії [26].

Системи фіксації включають:

- **Автоматизовані затискачі:** використовуються для жорсткого утримання пластикових або дерев'яних ящиків на платформі під час руху по схилах [27].
- **Вакуумні захвати (рис. 1.11):** інтегруються в роботизовані маніпулятори для швидкого переміщення ящиків з ґрунту на платформу або накривання їх кришками [28].



Рис. 1.11. Вакуумний захват

- **Адаптивні платформи:** деякі конструкції (наприклад, нове покоління Thorvald для виноградників) оснащені системою автоматичної компенсації нахилу, що підтримує горизонтальне положення вантажу навіть на крутих схилах [16].

1.3.3. Стабілізація та віброізоляція

Особливий інтерес для інженерів представляє використання метаматеріалів та пристроїв з квазінульовою жорсткістю (QZS) для віброізоляції ящиків [10]. Дослідження показують, що вкладиші в ящики, надруковані на 3D-принтері зі спеціальною геометрією ребер (кут 30°), здатні поглинати до 19% енергії ударів під час транспортування по пересіченій місцевості [10]. Це дозволяє значно продовжити термін зберігання фруктів та зберегти їх товарний вигляд [9].

1.3.4. Аналіз приводних систем та джерел енергії

Ефективність мобільної платформи безпосередньо залежить від параметрів її силової установки. У сучасному машинобудуванні спостерігається повний перехід до електричних приводів, що зумовлено їх високим ККД, екологічністю та простотою інтеграції в цифрові системи керування [6].

1.3.5. Мотор-колеса та їх переваги

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

Використання мотор-коліс (direct-drive або з інтегрованим планетарним редуктором) є пріоритетним для агроплатформ [12]. Це дозволяє:

1. Виключити складні механічні передачі (диференціали, карданні вали), що підвищує надійність [13].
2. Забезпечити незалежне керування швидкістю та вектором тяги кожного колеса, реалізуючи складні маневри, такі як розворот на місці [12].
3. Герметизувати привід за стандартом IP65/IP67, що критично для роботи в умовах високої запиленості та вологості саду [12].

1.3.6. Джерела енергії та системи управління живленням

Основним джерелом енергії є літій-залізо-фосфатні (LFP) акумулятори [12]. Вони мають вищу термічну стабільність та довший цикл життя порівняно з Li-ion [12]. Для платформ класу Burro або Thorvald ємність батарей зазвичай становить 2.5–5 кВт·год, що забезпечує до 8–10 годин безперервної роботи або пробіг до 15–20 км [12].

Прогресивним рішенням є впровадження систем автономної заміни батарей, де робот самостійно приїжджає на док-станцію, скидає розряджений блок і встановлює новий [29]. Це дозволяє підтримувати працездатність флоту роботів без тривалих простоїв на зарядку [29]. Також розглядаються гібридні схеми, де сонячні панелі на верхній частині платформи забезпечують живлення сенсорної підсистеми та допоміжних механізмів, подовжуючи автономність на 15–20% у сонячні дні [4].

Типові характеристики електродвигунів, що використовуються в сучасних агророботах.

Тип двигуна	Номінальна напруга	Номінальний момент	ККД	Переваги

BLDC (безколекторний)	24 - 48 В	5 - 15 Нм	85-92 %	Довговічність, низький шум
PMSM (синхронний)	48 - 80 В	10 - 30 Нм	90-95%	Висока точність керування
Кроковий двигун	12 - 24 В	1 - 5 Нм	60-70%	Не потребує енкодерів для позиціонування

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ РОБОТИЗОВАНОЇ МОБІЛЬНОЇ ПЛАТФОРМИ ДЛЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ ФРУКТІВ

2.1. Обґрунтування компоновання мобільної платформи

Вибір оптимального компоновання вантажної площадки є фундаментальним етапом проєктування, оскільки він безпосередньо визначає габарити, просторовий розподіл мас, стійкість та кінематичні характеристики мобільного робота. Основною вимогою технічного завдання є здатність платформи транспортувати стандартизовані пластикові ящики для фруктів.

Для визначення найкращої архітектури було розроблено та проаналізовано три варіанти компоновання вантажної зони, розраховані на розміщення 2, 3 та 4 ящиків відповідно. Аналіз проводився за критеріями габаритної ширини, довжини колісної бази, висоти центру ваги та кінематичного опору при бортовому повороті. Відомо, що для ефективного розвороту колісної платформи з бортовим керуванням співвідношення колісної бази (L) до ширини колії (B) повинно знаходитись у межах від 1,0 до 1,5. Якщо це співвідношення занадто велике, виникає надмірний опір боковому ковзанню коліс, що призводить до перевантаження двигунів та руйнування ґрунтового покриття.

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ РОБОТИЗОВАНОЇ МОБІЛЬНОЇ ПЛАТФОРМИ ДЛЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ ФРУКТІВ				Літ.	Арк.	Акрушів
Розроб.		Сачик Д.С.									
Перевір.		Ляшко А.П.								23	69
									НУБіП України		
Н. Контр.		Матухно Н.В.									
Затверд.		Ловейкін В.С.									

Варіанти компоновання вантажної зони

Параметр оцінки	Варіант 1: 2 ящики (1×2)	Варіант 2: 3 ящики (1×3)	Варіант 3: 4 ящики (2×2)
Схема розміщення	Один за одним поздовжньо	Один за одним поздовжньо	Два ряди по два ящики
Габарити площадки (Д×Ш), мм	1200 × 400	1800 × 400	1200 × 800
Корисне навантаження, кг	44	66	88
Орієнтовна колісна база L , мм	800	1400	1000
Орієнтовна колія B , мм	500	500	900
Кінематичне відношення L/B	1,60 (на межі норми)	2,80 (незадовільно)	1,11 (оптимально)
Вплив на стійкість	Низька поперечна стійкість	Низька поперечна стійкість	Висока поздовжня та поперечна

Логістична доцільність	Низька продуктивність	Середня продуктивність	Висока, формат європалети
------------------------	-----------------------	------------------------	---------------------------

Детальний розгляд варіанту 1 (конфігурація 1×2):

Розміщення двох ящиків у поздовжній ряд дозволяє створити надзвичайно вузьку платформу (ширина до 600 мм з урахуванням коліс). Це корисно для роботифікації виноградників або тепличних господарств зі щільною посадкою. Однак, корисне навантаження є занадто малим. Роботу доведеться частіше повертатися до пункту вивантаження, що робить співвідношення витраченої енергії на переміщення власної маси до маси корисного вантажу вкрай неефективним .

Детальний розгляд варіанту 2 (конфігурація 1×3):

Збільшення кількості ящиків до трьох у лінію призводить до суттєвого подовження платформи. Довжина колісної бази зростає до 1400–1500 мм. При малій ширині колії (близько 500 мм) кінематичне співвідношення L/B наближається до 3,0 . За таких умов бокове ковзання коліс під час повороту потребуватиме крутного моменту, який може перевищувати тяговий момент для прямолінійного руху в 2-3 рази. Це вимагатиме встановлення надлишково потужних двигунів та призведе до швидкого зносу шин.

Детальний розгляд варіанту 3 (конфігурація 2×2):

Розміщення чотирьох ящиків у формі прямокутника (два ряди по два) утворює вантажну площадку розміром 1200×800 мм. Цей розмір точно відповідає європейському логістичному стандарту (EUR-pallet), що дозволяє використовувати існуючі складські механізми для зняття всього блоку ящиків одночасно . Габаритна ширина платформи з урахуванням коліс становитиме близько 1000–1100 мм, що абсолютно прийнятно для фруктових садів. Відношення $L/B \approx 1.1$ забезпечує ідеальні умови для диференційного повороту .

Висновок: на основі порівняльного аналізу кінематичних та логістичних властивостей, безальтернативно оптимальною визнається конфігурація для 4

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

ящиків (Варіант 3). Усі подальші інженерні розрахунки будуть базуватися на цій архітектурі.

2.2. Вибір стандартної тари для фруктів

У європейській та вітчизняній аграрній логістиці для збору делікатних плодів (яблука, груші, персики) застосовується спеціалізована пластикова тара багаторазового використання. Такі ящики виготовляються з харчового поліетилену низького тиску (HDPE), мають перфоровані стінки для забезпечення циркуляції повітря та посилене дно для можливості штабелювання.

Для проєктування вантажної платформи приймаємо стандартний аграрний ящик формату KLT або його аналоги. Згідно з вихідними даними, фізичні параметри одного ящика становлять:

Довжина ящика: $L_{\text{ящ}} = 600$ мм;

Ширина ящика: $B_{\text{ящ}} = 400$ мм;

Висота ящика: $H_{\text{ящ}} = 300$ мм;

Власна маса порожнього ящика (тари): $m_{\text{порож}} = 2$ кг;

Нормативна маса фруктів (корисного об'єму): $m_{\text{фрукт}} = 20$ кг.

Повна маса одного завантаженого ящика ($m_{\text{ящ}}$) обчислюється як сума маси тари та маси плодів:

$$m_{\text{ящ}} = m_{\text{порожн}} + m_{\text{фрукт}} = 2 + 20 = 22 \text{ кг}, \quad (2.1)$$

2.3. Розрахунок маси вантажу

Корисне навантаження платформи є одним із ключових параметрів для виконання тягового та міцнісного розрахунків. Здатність робота перевозити розрахункову масу без перевантаження приводів визначає його експлуатаційну ефективність.

Маса корисного вантажу ($m_{\text{ван}}$) визначається як добуток маси одного повністю завантаженого ящика на максимальну кількість ящиків:

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

$$m_{\text{ван}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{ящ}}} m_{\text{ящ}_i} = n_{\text{ящ}} \cdot m_{\text{ящ}}, \quad (2.2)$$

де $n_{\text{ящ}} = 4$ – кількість ящиків.

$$m_{\text{ван}} = 4 \cdot 22 = 88 \text{ кг}$$

У реальних умовах збору врожаю маса ящиків може незначно варіюватися залежно від калібру та щільності укладання фруктів. Проте для інженерних розрахунків приймається стандартизоване максимальне значення 88 кг.

2.4. Визначення максимальної кількості ящиків

Як було обґрунтовано в розділі компонування, максимальна кількість ящиків становить 4 одиниці. Таке обмеження введено не лише з міркувань геометрії та кінематики диференційного приводу, але й з огляду на ергономіку взаємодії людини з роботом.

Автономна платформа має висоту вантажної площадки орієнтовно 450–500 мм від рівня ґрунту. Розміщення ящиків у один ярус дозволяє працівникам-збирачам легко ставити заповнені ящики на платформу без надмірного навантаження на хребет. Якщо передбачити штабелювання ящиків у два яруси, висота завантаження другого ярусу становитиме близько 800 мм, а центр ваги усієї машини критично зміститься вгору, що значно підвищить ризик перекидання робота на схилах понад 5–7°.

Отже, обмеження місткості до 4 ящиків в один рівень є оптимальним компромісом між логістичною ефективністю, кінематичною стабільністю шасі та стандартами безпеки праці.

2.5. Розрахунок загальної маси платформи

Для виконання тягово-динамічних розрахунків необхідно визначити повну масу роботизованої платформи (M), яка складається з маси корисного вантажу ($m_{\text{кор}}$) та маси спорядженого шасі (m_0).

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оскільки платформа проектується з нуля, власна маса m_0 розраховується шляхом підсумовування мас основних вузлів та агрегатів. Згідно з технічним завданням, орієнтовна власна маса має знаходитися в межах 80–120 кг.

Таблиця 2.2.

Деталізований розподіл мас агрегатів (орієнтовний розрахунок)

Найменування вузла / агрегату	Кількість, шт.	Маса 1 од., кг	Загальна маса, кг
Несуча рама та вантажна площадка (стал S235)	1	38	38
Електродвигуни з редукторами	4	4,2	16,8
Пневматичні колеса у зборі	4	3,5	14
Акумуляторна батарея (LiFePO ₄ , 48V, 60Ah)	1	24,5	24,5
Блоки керування двигунами	4	0,8	3,2

Центральний обчислювальний блок (ІРС), антени	1	2,5	2,5
Кабельні траси, зовнішні панелі	1 компл.	9,5	9,5
Власна маса платформи (m_0)			112

Розрахункова власна маса $m_0 = 112$ кг лежить у заданому діапазоні (80–120 кг).

Загальна (повна) маса завантаженої платформи становить:

$$M = m_0 + m_{\text{кор}} = 112 + 88 = 200 \text{ кг}, \quad (2.3)$$

Вага (нормальне навантаження на горизонтальну поверхню), використовуючи прискорення вільного падіння $g = 9,81 \text{ м/с}^2$:

$$W = M \cdot g = 200 \cdot 9,81 = 1962 \text{ Н}, \quad (2.4)$$

Статичне навантаження на одне колесо становитиме:

$$W_{\text{стат}} = \frac{W}{4} = \frac{1962}{4} = 490,5 \text{ Н}, \quad (2.5)$$

2.6. Тяговий розрахунок руху по ґрунтовій поверхні

Тяговий розрахунок мобільного робота базується на принципах класичної терамеханіки. При русі пневматичного колеса по деформівній поверхні (ґрунт саду) виникає складна система взаємодії: деформується як сама шина, так і ґрунт

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

під нею. Це призводить до утворення колії та виникнення гістерезисних втрат у гумі, що в сукупності формує опір коченню .

Для адекватного підбору потужності приводів необхідно розглянути найважчий розрахунковий випадок експлуатації . Згідно з умовами роботи в садах, таким випадком є розгін повністю завантаженої платформи на максимальному підйомі (ухил $\alpha = 10^\circ$) по пухкій ґрунтовій дорозі.

Сумарна сила опору руху ($F_{заг}$) у загальному вигляді описується рівнянням балансу тяги :

$$F_{заг} = F_r + F_g + F_a + F_w, \quad (2.6)$$

де:

F_r – сила опору коченню коліс;

F_g – сила опору підйому (гравітаційна складова);

F_a – сила опору інерції (динамічна складова при розгоні);

F_w – сила аеродинамічного опору повітря.

Оскільки максимальна швидкість руху платформи обмежена значенням $v_{max} = 6 \text{ км/год} = 1,667 \text{ м/с}$, вплив аеродинамічного опору F_w є мізерно малим і традиційно нехтується . Тому рівняння спрощується до:

$$F_{заг} = F_r + F_g + F_a, \quad (2.7)$$

Приймаємо зовнішній діаметр пневматичного колеса $D = 330 \text{ мм}$.

Радіус колеса: $r = \frac{D}{2} = 165 = 0,165 \text{ м}$.

2.7. Розрахунок необхідної сили тяги

2.7.1. Розрахунок сили опору коченню (F_r)

Сила опору коченню залежить від нормальної реакції ґрунту та коефіцієнта опору коченню f_r . Під час руху на схилі нормальна реакція зменшується пропорційно косинусу кута нахилу:

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$F_r = M \cdot g \cdot f_r \cdot \cos(\alpha), \quad (2.8)$$

Коефіцієнт f_r є емпіричною величиною. За даними ДУ «НМЦ ВФПО», для колісних тракторів коефіцієнт опору коченню по вологій стерні та пухкому ґрунту становить $f_r = 0,08 \dots 0,12$. Для забезпечення надійності розрахунку обираємо максимальне значення: $f_r = 0,12$. Заданий максимальний кут підйому $\alpha = 10^\circ$.

$$F_r = 200 \cdot 9,81 \cdot 0,12 \cdot 0,9848 = 231,86 \text{ Н},$$

2.7.2. Розрахунок опору підйому (F_g)

Сила опору підйому виникає через проекцію вектора сили тяжіння на площину, паралельну опорній поверхні :

$$F_g = M \cdot g \cdot \sin(\alpha), \quad (2.9)$$

$$F_g = 200 \cdot 9,81 \cdot 0,1736 = 340,6 \text{ Н},$$

Як бачимо, на ухилі 10° гравітаційна складова значно перевищує опір коченню і є домінуючим фактором навантаження.

2.7.3. Розрахунок сили інерції при розгоні (F_a)

Динамічний опір виникає під час зміни швидкості платформи. Приймаємо час інтенсивного розгону $t_{\text{роз}} = 3 \text{ с}$ до досягнення швидкості $v_{\text{max}} = 1,67 \text{ м/с}$. Лінійне прискорення:

$$a = \frac{t_{\text{роз}}}{v_{\text{max}}} = \frac{1,67}{3} = 0,556 \text{ м/с}^2 \quad (2.10)$$

Сила інерції обчислюється з урахуванням обертових мас коліс та роторів (коефіцієнт $\delta \approx 1,05$):

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$F_r = M \cdot a \cdot \delta = 200 \cdot 0,556 \cdot 1,05 = 116,76 \text{ Н}, \quad (2.11)$$

2.7.4. Визначення сумарної тягової сили

Максимальна сумарна сила тяги:

$$F_{\text{заг}} = F_r + F_g + F_a = 231,86 + 340,6 + 116,76 = 689,22 \text{ Н}$$

2.8. Розрахунок крутного моменту на колесах та перевірка зчеплення

2.8.1. Необхідний крутний момент

Необхідна дотична сила тяги на одному колесі (F_w):

$$F_w = \frac{F_{\text{заг}}}{4} = \frac{689,22}{4} = 172,3 \text{ Н}, \quad (2.12)$$

Необхідний крутний момент на осі одного колеса (T_w) дорівнює добутку сили тяги на динамічний радіус колеса ($r_{\text{кол}} \approx 0,165 \text{ м}$):

$$T_w = F_w \cdot r_{\text{кол}} = 172,3 \cdot 0,165 = 28,43 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (2.13)$$

2.8.2. Перевірка за умовами зчеплення з ґрунтом

Максимальна сила зчеплення обмежується властивостями ґрунту. Спрощена перевірка виконується за коефіцієнтом зчеплення (φ):

$$F_w \leq F_{\text{зч}} = R_z \cdot \varphi, \quad (2.14)$$

де R_z – нормальна реакція ґрунту на колесо під час руху на схилі 10° :

$$R_z = \frac{M \cdot g \cdot \cos(10^\circ)}{4} = 482,9 \text{ Н}, \quad (2.15)$$

За даними трибологічних досліджень взаємодії гуми та ґрунту, коефіцієнт зчеплення становить $\varphi = 0,5 \dots 0,65$. Приймаємо консервативне значення $\varphi = 0,5$.

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$F_{зч} = 482,9 \cdot 0,5 = 241,45 \text{ Н}$$

Оскільки $172,3 \text{ Н} < 241,45 \text{ Н}$, запас за зчепленням становить близько 40%, що гарантує рух без буксування .

2.9. Підбір електродвигунів приводу коліс

Для забезпечення високого ККД, довговічності та простоти інтеграції із цифровими системами керування (ROS 2), стандартом для сучасної робототехніки є безколекторні двигуни постійного струму (BLDC) .

2.9.1. Визначення розрахункової потужності

Обчислимо необхідну кутову швидкість колеса ($\omega_{\text{кол}}$) при $v_{\text{max}} = 1,67 \text{ м/с}$:

$$\omega_{\text{кол}} = \frac{v_{\text{max}}}{r} = \frac{1,67}{0,165} = 10,10 \text{ рад/с}, \quad (2.16)$$

Частота обертання колеса:

$$n_w = \frac{30 \cdot \omega_{\text{кол}}}{\pi} = 96,45 \text{ об/хв}, \quad (2.17)$$

Пікова механічна потужність на осі одного колеса під час розгону на схилі ($P_{\text{мех}}$):

$$P_{\text{мех}} = T_{\text{мех}} \cdot \omega_{\text{кол}} = 28,43 \cdot 10,10 = 287,1 \text{ Вт}, \quad (2.18)$$

З урахуванням втрат у редукторі (ККД $\eta_{\text{ред}} = 0,85$), необхідна пікова механічна потужність на валу електродвигуна ($P_{\text{пik. пот.}}$) має бути:

$$P_{\text{пik. пот}} = \frac{P_{\text{мех}}}{\eta} = \frac{287,1}{0,85} = 337,8 \text{ Вт}, \quad (2.19)$$

2.9.2. Вибір конкретної моделі двигуна

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

Для даного проєкту обрано інтегрований BLDC двигун Dunkermotoren BG 75x75 dPro . Цей двигун розроблений спеціально для мобільних роботів і підтримує керування по шині CANopen.

Таблиця 2.3.

Основні технічні характеристики Dunkermotoren BG 75x75 dPro:

Параметр	Значення
Номінальна напруга (U)	48 В постійного струму
Номінальна тривала потужність ($P_{ном}$)	570 Вт
Номінальний крутний момент ($T_{ном}$)	1,49 Н·м
Піковий крутний момент (T_{max})	6,15 Н·м ² ,
Номінальна частота обертання ($n_{ном}$)	3650 об/хв

Номінальна потужність двигуна 570 Вт покриває пікову розрахункову потребу (337,8 Вт) із запасом. Піковий момент становить 6,15 Н·м, що дозволяє витримувати високі динамічні перевантаження під час маневрування [31].

2.10. Розрахунок редуктора та передавального механізму

Електродвигун BG 75x75 dPro є високообертовим, тому застосовується понижувальна механічна передача – планетарний редуктор .

Теоретичне передаточне відношення ($i_{теор}$):

$$i_{теор} = \frac{n_{пот}}{n_w} = \frac{3650}{96,45} \approx 37,84, \quad (2.20)$$

Обираємо двоступеневий планетарний редуктор **PLG 75** із передаточним відношенням $i = 36$.

Фактична частота обертання колеса становитиме:

$$n_{факт} = \frac{n_{пот}}{i} = \frac{3650}{36} = 101,38 \text{ об/хв}, \quad (2.21)$$

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

Фактична лінійна швидкість: $v_{\text{факт}} \approx 6,3$ км/год, що відповідає технічному завданню.

Фактичний номінальний крутний момент на осі колеса ($T_{\text{факт}}$):

$$T_{\text{факт}} = T_{\text{ном}} \cdot i \cdot \eta = 1,49 \cdot 36 \cdot 0,85 = 45,59 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (2.22)$$

Коефіцієнт тягового запасу $K_t = 1,6$, що є критично важливим для компенсації підвищених енерговитрат під час поворотів за схемою skid-steer.

2.11. Розрахунок енергоспоживання

Приймаємо середню експлуатаційну швидкість $v_{\text{сер}} = 1,11$ м/с (4 км/год).

Середній опір руху по рівній ґрунтовій поверхні:

$$F_{\text{сер(рів)}} = M \cdot g \cdot f_r = 200 \cdot 9,81 \cdot 0,12 = 253,44 \text{ Н}, \quad (2.23)$$

Середня механічна потужність для подолання цього опору:

$$P_{\text{сер(мех)}} = F_{\text{сер(рів)}} \cdot v_{\text{сер}} = 253,44 \cdot 1,11 = 281,32 \text{ Вт}, \quad (2.24)$$

Загальний ККД ($\eta_{\text{заг}}$) складається з ККД редуктора ($\eta_{\text{ред}} = 0,85$) та ККД серводвигуна з контролером ($\eta_{\text{серв}} = 0,85$):

$$\eta_{\text{заг}} = \eta_{\text{ред}} \cdot \eta_{\text{серв}} = 0,85 \cdot 0,85 = 0,7225, \quad (2.25)$$

Середня електрична потужність, що споживається ходовою частиною:

$$P_{\text{сер(елкт)}} = \frac{P_{\text{сер(мех)}}}{\eta_{\text{заг}}} = \frac{281,32}{0,7225} = 389,33 \text{ Вт}, \quad (2.26)$$

Споживання сенсорної та обчислювальної підсистем становить орієнтовно $P_{\text{сис}} = 80$ Вт.

2.12. Розрахунок акумуляторної батареї

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Приймаємо робочий цикл (k_d), у якому 60% часу ($k_d = 0,6$) платформа пересувається, а 40% часу стоїть у режимі очікування. Загальна енергія, необхідна на 8-годинну зміну ($E_{\text{заг}}$):

$$E_{\text{заг}} = [P_{\text{сер(елкт)}} \cdot (t \cdot k_d)] + [P_{\text{сис}} \cdot t], \quad (2.27)$$

$$E_{\text{заг}} = [361,7 \cdot (8 \cdot 0,6)] + [80 \cdot 8] = 2376,16 \text{ Вт} \cdot \text{год}$$

Для сільськогосподарської робототехніки найкраще підходить літій-залізо-фосфатна (LiFePO_4) система, яка має значно вищий ресурс та є безпечною при пошкодженнях. Системна напруга – 48 В (фактична 51,2 В).

Теоретична ємність батареї ($C_{\text{теор}}$):

$$C_{\text{теор}} = \frac{E_{\text{заг}}}{U} = \frac{2376,16}{51,2} = 46,41 \text{ А} \cdot \text{год}, \quad (2.28)$$

Глибина розряду (Depth of Discharge, DoD) не повинна перевищувати 80% ($k_{\text{dod}} = 0,8$). Фактична необхідна ємність:

$$C_{\text{факт}} = \frac{C_{\text{теор}}}{k_{\text{dod}}} = \frac{46,41}{0,8} = 58,01 \text{ А} \cdot \text{год}, \quad (2.29)$$

Вибір батареї: Для реалізації платформи приймається промисловий акумулятор LiFePO_4 з параметрами: 48 В (51,2 В), **60 А·год**.

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ МОБІЛЬНОЇ ПЛАТФОРМИ ДЛЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ ФРУКТІВ

Забезпечення безпечних умов праці в сучасному сільськогосподарському виробництві є пріоритетним завданням під час проєктування та впровадження новітніх засобів механізації. Перехід від традиційних ручних методів збирання врожаю з використанням драбин до застосування мобільних підіймальних платформ дозволяє не лише оптимізувати технологічні процеси та підвищити продуктивність, але й суттєво змінити профіль професійних ризиків [58], [59]. У межах розробки конструкції мобільної платформи для транспортування фруктів необхідно імплементувати концепцію превентивного управління ризиками, що регламентується базовим міжнародним стандартом ДСТУ EN ISO 12100:2016 «Безпечність машин. Загальні принципи проєктування» [50]. Цей розділ містить вичерпний аналіз потенційних небезпек, а також інженерно-технічні та організаційні заходи щодо їх мінімізації на етапах експлуатації, технічного обслуговування та ремонту розробленої платформи з урахуванням сучасних нормативно-правових актів з охорони праці.

3.1. Аналіз небезпечних і шкідливих факторів при експлуатації мобільної платформи

Специфіка функціонування мобільної платформи в умовах фруктового саду або поля зумовлює формування складного виробничого середовища, де на оператора діє сукупність фізичних, біомеханічних та кліматичних небезпечних факторів. Згідно з вимогами стандарту ДСТУ EN ISO 4254-1:2017 [51], ідентифікація ризиків є першим етапом у створенні безпечної машини.

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ							
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ МОБІЛЬНОЇ ПЛАТФОРМИ ДЛЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ ФРУКТІВ			Літ.	Арк.	Акрушіє		
Розроб.		Сачик Д.С.								37	69	
Перевір.		Ляшко А.П.						НУБіП України				
Н. Контр.		Матухно Н.В.										
Затверд.		Ловейкін В.С.										

Небезпека рухомих елементів конструкції

Кінематична схема мобільної платформи містить значну кількість відкритих і прихованих механічних вузлів, що здійснюють обертальний, зворотно-поступальний або комбінований рух. До таких елементів належать: гідравлічні або електричні приводи ножичного підймального механізму, розсувні рами для розширення робочої зони, вали трансмісії, незалежні підвіски коліс, а також елементи конвеєра (за наявності) для переміщення тари [59].

З точки зору безпеки праці, ці механізми генерують такі зони небезпеки:

- **Зони захоплення та затягування:** виникають у місцях контакту пасових, ланцюгових передач або обертових валів. Потрапляння вільного одягу, елементів спорядження або волосся в ці зони призводить до миттєвого затягування кінцівок оператора.

- **Зони здавлювання та відрізання (ножичного типу):** формуються між рухомими важелями підймального механізму платформи та статичною рамою шасі під час опускання або підймання кошика.

- **Ударні зони:** виникають при раптовому висуванні бічних консолей платформи.

Оскільки під час роботи у кроні дерева увага оператора переважно сфокусована на процесі вибору та збирання плодів, а не на моніторингу просторового положення частин машини, ризик несанкціонованого контакту з рухомими елементами класифікується як критичний [50].

Ризик травмування під час завантаження та розвантаження ящиків з фруктами

Незважаючи на те, що використання мобільної платформи виключає необхідність постійного підйому та спуску по сходах драбини, процеси маніпуляції з тарою залишаються фактором високого біомеханічного навантаження. Заповнений ящик з фруктами може важити від 15 до 25 кг. Згідно з нормативними вимогами НПАОП 0.00-1.75-15 «Правила охорони праці під час

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

вантажно-розвантажувальних робіт», постійне ручне переміщення таких вантажів вимагає жорсткої регламентації та оцінки ризиків [53].

Дослідження ергономіки роботи на мобільних платформах, проведені Національним інститутом охорони праці (NIOSH), свідчать про те, що хоча платформи значно знижують час перебування працівника з відведеними вище рівня плечей руками та нахилом спини вперед понад 20 градусів [58], маніпуляції з повними ящиками генерують високе компресійне навантаження на поперековий відділ хребта (зокрема, диски L4-L5). Основні ризики включають:

- Виникнення кумулятивних травм опорно-рухового апарату (RSI) через асиметричне підіймання ящиків (з одночасним скручуванням тулуба).
- Ризик падіння ящика на нижні кінцівки працівника внаслідок втрати рівноваги під час руху платформи.
- Перенапруження м'язів плечового пояса при спробах розмістити ящики у верхніх ярусах транспортного контейнера платформи.

Таблиця 3.1.

Порівняльний аналіз ергономічних показників та ризиків при використанні традиційних засобів і мобільної платформи

Ергономічний параметр	Робота з драбини	Робота з мобільної платформи	Рівень зниження ризику
Відведення рук > 60°	35–45% робочого часу	10–15% робочого часу	Високий
Згинання тулуба > 20°	Висока частота	Низька (доступне регулювання висоти)	Високий

Підйом вантажу > 15 кг	Спуск по нестабільній опорі	Горизонтальне переміщення по підлозі	Середній
------------------------	-----------------------------	--------------------------------------	----------

Електробезпека

Проектована мобільна платформа використовує гібридний або повністю електричний привод (з напругою систем живлення 48 В, 96 В або вище), що автоматично переводить її до класу обладнання з підвищеною небезпекою ураження електричним струмом. Відповідно до ДСТУ 7237:2011 «Система стандартів безпеки праці. Електробезпека» та ДСТУ EN 60204-1:2015, експлуатація таких систем у польових умовах супроводжується низкою специфічних факторів [54], [55].

Головними ризиками є:

- **Прямий дотик:** контакт оператора зі струмовідними частинами кабельних ліній або розподільчих щитів, які можуть бути пошкоджені гілками дерев під час руху садом.
- **Непрямий дотик:** поява небезпечного потенціалу на металевих конструкціях платформи внаслідок пробоя ізоляції. Умови фруктових садів (висока вологість повітря, роса на листі, мокрий ґрунт, наявність металевих взуття або інструменту) різко знижують електричний опір тіла людини, що багаторазово підвищує тяжкість наслідків навіть при впливі струмів витоку.
- **Небезпека акумуляторних систем:** використання високоємних літій-іонних або тягових свинцево-кислотних батарей супроводжується ризиком короткого замикання, що може спричинити електричну дугу, термічний розгін батареї (температура може сягати понад 600 °С) та викид токсичних газів, що здатні до самозаймання [55].

Шум і вібрації

Тривала експлуатація самохідної машини формує стійкий вплив акустичного та вібраційного навантаження на організм оператора. Рівень шуму

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

генерується роботою гідравлічних pomp, тягових електродвигунів або двигуна внутрішнього згоряння (у гібридній конфігурації), а також механічним тертям елементів ходової частини [51]. Перевищення еквівалентного рівня звуку понад 80 дБ(А) протягом робочої зміни маскує важливі попереджувальні сигнали, викликає когнітивну втому та створює ризик розвитку сенсоневральної приглухуватості.

Вібраційний вплив поділяється на дві категорії:

- **Локальна вібрація:** передається через органи керування (джойстики, кермо) і здатна викликати спазм периферійних судин (вібраційну хворобу).

- **Загальна вібрація:** передається від шасі через підлогу платформи на все тіло працівника. Під час руху нерівним рельєфом саду низькочастотні коливання (від 1 до 20 Гц) входять у резонанс із внутрішніми органами людини, спричиняючи мікротравматизацію міжхребцевих дисків та порушення вестибулярного апарату [58].

Небезпека перекидання платформи

Забезпечення статичної та динамічної стійкості є критичною інженерною проблемою для техніки, що здійснює підйом людей. Мобільна платформа має зміщений угору центр мас, особливо коли кошик із робітниками та зібраним врожаєм піднятий на максимальну висоту (2,5–4,5 м) [59]. Принципи оцінки стійкості самохідних сільськогосподарських машин регламентуються міжнародним стандартом ISO 16231-1:2013 [57].

Ризик перекидання (rollover) або перехиляння (tip-over) детермінується наступними факторами:

- **Статичні фактори:** робота на крутих схилах, що перевищують паспортний ліміт машини. Якщо вектор сили тяжіння, що проходить через загальний центр мас ($h_{\text{цм}}$), виходить за межі контуру опори (утвореного точками контакту коліс із ґрунтом), машина втрачає рівновагу [57]. НПАОП 0.00-1.75-15

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

обмежує допустимий ухил майданчика для вантажно-розвантажувальних робіт показником у 5 градусів [53].

- **Динамічні фактори:** раптове гальмування, проходження поворотів на підвищеній швидкості (відцентрова сила), а також синхронне переміщення кількох робітників на один край платформи генерують додатковий перекидний момент, здатний перекинути навіть машину, яка стоїть на рівній поверхні.

Вплив погодних умов під час роботи у саду або полі

Специфіка аграрного сектору зумовлює високу залежність умов праці від метеорологічних факторів. Відкрита архітектура мобільної платформи залишає робітників незахищеними від впливу навколишнього середовища:

- **Температурні екстремуми:** Робота під прямими сонячними променями при температурах понад +28 °C викликає тепловий стрес, зниження уваги та ризик теплового удару. Водночас високі температури негативно впливають на системи охолодження тягових батарей [55].

- **Атмосферні опади:** Дощ, мряка або рясна ранкова роса змочують підлогу платформи. Зниження коефіцієнта тертя між підошвою взуття та підлогою створює критичний ризик послизання та подальшого падіння з висоти.

- **Зміна фізико-механічних властивостей ґрунту:** Зволоження перетворює чорнозем або суглинок на пластичну масу з низькою несучою здатністю. Це провокує нерівномірне просідання окремих коліс шасі, що може викликати раптове креніння і падіння працівників на підлогу кошика [57].

Ризики при русі нерівною поверхнею

Садівні міжряддя характеризуються наявністю технологічних колій, ям, виступаючого коріння дерев та грудок землі. Мобільна платформа, переміщуючись таким мікрорельєфом, генерує значні кутові прискорення (тангаж і крен). Закони кінематики зумовлюють явище ампліфікації: невелике коливання шасі на рівні землі перетворюється на розмашистий рух піднятої платформи (ефект «хлиста»). Раптовий наїзд на перешкоду генерує ударний імпульс, здатний відкинути оператора на жорсткі елементи огороження,

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

спричинити випадання за межі платформи або втрату контролю над ящиками з фруктами, що знаходяться в руках працівника [51].

3.2. Заходи з підвищення безпеки роботи мобільної платформи

З метою усунення або зниження виявлених ризиків до прийнятного рівня, керуючись ієрархією зменшення ризиків за ДСТУ EN ISO 12100:2016, на етапі конструювання платформи інтегровано комплекс запобіжних інженерно-технічних та ергономічних рішень [50].

Встановлення захисних кожухів

Відповідно до вимог НПАОП 01.0-1.02-18 «Правила охорони праці у сільськогосподарському виробництві», усі обертові деталі та кінематичні вузли, що становлять небезпеку, ізолюються захисними кожухами [52]. Геометрія та розташування кожухів розраховуються на базі нормативів безпечних відстаней до небезпечних зон.

Матеріалом для кожухів слугують ударостійкі полімери або перфорована штампована сталь. Кожухи ножичного механізму виконуються у вигляді телескопічних гофрованих екранів (гармошок), які унеможливають потрапляння кінцівок у зони здавлювання під час опускання платформи. Фіксація кожухів здійснюється за допомогою кріплень, зняття яких неможливе без застосування спеціалізованого інструменту, що запобігає несанкціонованому втручання оператора в механізми під час їх роботи [50], [51].

Аварійне вимкнення

Реалізація функції аварійного зупинення (E-stop) є базовою вимогою ДСТУ EN 60204-1:2015 [55]. Система аварійного вимкнення платформи базується на концепції зупинки Категорії 0 (миттєве знеструмлення виконавчих механізмів) або Категорії 1 (контрольована зупинка з подальшим знеструмленням).

Кнопки аварійного зупинення грибоподібного типу з функцією механічного блокування червоного кольору на жовтому тлі встановлюються:

- На основному пульті керування оператора на платформі.

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

- На кожному розі шасі машини на рівні очей наземного працівника, щоб забезпечити швидкий доступ ззовні.

При активації кнопки система миттєво відключає тягові електродвигуни, активує електромагнітні гальма та блокує гідророзподільники підйимального механізму, фіксуючи платформу у поточному положенні [55]. Повернення системи до робочого стану (перезапуск) неможливе лише шляхом відтискання кнопки E-stop – вимагається підтвердження безпеки через головний контролер.

Світлова та звукова сигналізація

Враховуючи вимоги стандарту ISO 18497:2018 (щодо машин з високим ступенем автоматизації), інформаційна взаємодія машини з навколишнім середовищем забезпечується комплексною системою сигналізації [56].

Оптична сигналізація: шасі оснащується проблісковим маячком оранжевого кольору, який вмикається автоматично при активації енергосистеми машини та працює протягом усього часу руху або маневрування.

Акустична сигналізація: передбачено зумер заднього ходу, що активується під час реверсивного руху з рівнем звукового тиску, який щонайменше на 10 дБ(А) перевищує рівень фонового шуму саду.

Система виявлення перешкод: опціонально платформа оснащується ультразвуковими сонарами або лідаром для локалізації «сліпих зон». При виявленні людини або перешкоди на відстані менше 2 метрів по ходу руху, система генерує переривчастий звуковий сигнал, а при наближенні на дистанцію менше 0,5 метра – ініціює примусове гальмування [56].

Обмеження швидкості руху

Програмно-апаратний комплекс управління платформою обмежує динамічні характеристики машини залежно від її поточного стану та виконуваної операції, що корелює з правилами вантажно-розвантажувальних робіт [53]. Обмеження інтегровані в алгоритми частотних перетворювачів:

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

Таблиця 3.2.

Швидкісні режими роботи мобільної платформи та їх технологічне обґрунтування

Режим та стан мобільної платформи	Максимально дозволена швидкість	Технологічне обґрунтування
Транспортний режим (кошик у крайньому нижньому положенні)	10 км/год	Переміщення між ділянками по рівній поверхні. Забезпечує прийнятну кінетичну енергію при екстреному гальмуванні.
Маневровий режим (проходження перехресть, поворот коліс $> 20^\circ$)	5 км/год	Зменшення відцентрової сили для запобігання бічному перекиданню [57].
Робочий режим (збирання врожаю, платформа піднята > 1 м)	2–3 км/год	Плавне позиціонування вздовж крони. Зменшення ударних навантажень (ефекту «хлиста») при наїзді на ями [51].

Будь-яка спроба перевищити встановлений ліміт при піднятій платформі автоматично відхиляється контролером, який примусово скидає швидкість до безпечного значення.

3.2.1. Покращення стійкості конструкції

Фундаментальним підходом до протидії ризикам перекидання є розширення бази та зниження центру мас. Конструкція платформи реалізує активну і пасивну стабілізацію згідно з ISO 16231-1 [57].

Пасивна стабілізація: акумуляторні батареї та масивні гідравлічні компоненти інтегровані в нижню частину шасі, що зміщує загальний центр мас максимально близько до землі. Гумові шини низького тиску з широким профілем забезпечують велику площу контакту з ґрунтом.

Активна стабілізація: шасі обладнане двохосьовими електронними інклінометрами. Якщо система фіксує нахил поверхні, що наближається до критичної позначки (наприклад, $4,5^\circ$ при дозовлених 5° [53], [57]), мікроконтролер блокує подальший підйом кошика вгору та активує світлозвукову тривогу на пульті оператора, вимагаючи негайного спуску платформи для відновлення запасу стійкості. Крім того, машина оснащується гідравлічними аутригерами (виносними опорами) для фіксації під час стаціонарних вантажно-розвантажувальних робіт.

Використання неслизьких поверхонь

Для мінімізації ризику послизання підлога робочої зони платформи та сходинки виготовляються зі сталевого просічно-витяжного листа. Така геометрична структура забезпечує агресивне зчеплення з підшвою робочого взуття (коефіцієнт тертя $\mu > 0,6$) та сприяє ефективному самоочищенню – бруд, вода та фрагменти листа мимовільно продавляються крізь отвори, не утворюючи слизької плівки на поверхні. Краї платформи, перила та зони зміни висоти підлоги маркуються контрастними жовто-чорними сигнальними смугами згідно з вимогами стандартизації сигнальних кольорів (НПАОП 0.00-1.75-15) [53]. Робоча зона платформи в обов'язковому порядку по периметру оснащується

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

жорсткими захисними огороженнями (перилами) висотою не менше 1,1 м та проміжним бортовим елементом для захисту від випадання інструменту чи ящиків [51].

Рекомендації щодо безпечної експлуатації оператором

Ефективність технічних засобів безпеки залежить від правильних дій персоналу. На основі аналізу найкращих практик експлуатації машин у фруктових садах [58], [59], розроблено наступний алгоритм безпеки для операторів:

- **Позиціювання персоналу:** суворо забороняється робота або знаходження наземних працівників у напрямку руху платформи («сліпих зонах») під час виконання маневрів [56].

- **Ротація робітників:** для профілактики втоми та зниження біомеханічного навантаження рекомендується здійснювати періодичну ротацію операторів платформи та працівників, що приймають тару на землі [58].

- **Оптимізація робочої пози:** висота платформи повинна оперативно коригуватися так, щоб зона зрізання фруктів знаходилася в діапазоні від рівня пояса до рівня грудей робітника. Це мінімізує кути згинання спини та підйом рук вище рівня плечей, зберігаючи фізіологічно правильну поставу [58].

- **Контроль маси:** категорично забороняється перевищувати паспортну вантажність платформи (кількість робітників + маса тари). Розподіл ящиків по платформі має бути рівномірним для уникнення асиметричного перекидного моменту.

- **Допуск до роботи:** до управління платформою допускаються виключно особи, які досягли 18 років, пройшли відповідне медичне обстеження, вступний та первинний інструктажі з охорони праці та мають посвідчення на право керування відповідними сільськогосподарськими машинами [52].

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

3.3. Вимоги до техніки безпеки під час обслуговування та ремонту

Фаза технічного обслуговування (ТО) і ремонту є одним із найнебезпечніших етапів життєвого циклу мобільної платформи, оскільки передбачає демонтаж захисних кожухів, втручання у силові електричні кола та перебування персоналу поблизу гідравлічних систем під високим тиском. Вимоги до організації цих робіт базуються на положеннях ДСТУ EN 60204-1:2015 [55] та відповідних нормативно-правових актів у сфері агропромислового виробництва [52].

Знеструмлення системи перед ремонтом

Перед початком будь-яких ремонтних операцій на платформі має бути реалізована жорстка процедура блокування та маркування джерел енергії (Lockout/Tagout – LOTO) [55]. Алгоритм передбачає:

- Вимкнення головного роз'єднувача (вимикача) акумуляторної батареї.
- Фізичне блокування вимикача за допомогою навісного замка, ключ від якого знаходиться виключно у працівника, що виконує ремонт.
- Обов'язкове розрядження залишкової електричної ємності інверторів і конденсаторів за допомогою спеціальних резисторів, а також скидання надлишкового тиску в гідроакумуляторах та магістралях гідросистеми платформи, щоб уникнути несанкціонованого руху штоків гідроциліндрів під час від'єднання фітингів [51].

Використання засобів індивідуального захисту

Працівники, залучені до ТО та ремонту, зобов'язані застосовувати сертифіковані засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) відповідно до профілю ризиків:

Під час роботи з тяговими акумуляторами та силовими колами використовуються діелектричні рукавички, діелектричні боти та електромонтажний ізольований інструмент, що проходить регулярні перевірки [54].

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

У разі використання стисненого повітря для продувки радіаторів, електродвигунів або фільтрів обов'язковим є носіння захисних закритих окулярів для запобігання ураженню очей дрібнодисперсним пилом та абразивними частинками.

При роботах під піднятою платформою (навіть зафіксованою механічно) необхідно використовувати захисні каски [53].

Правила роботи з електрообладнанням

Гібридна та електрична природа платформи висуває жорсткі вимоги до компетенції персоналу. Будь-які діагностичні та ремонтні роботи в розподільчих щитах можуть виконуватися виключно після перевірки відсутності напруги за допомогою повірених мультиметрів. Забороняється здійснювати шунтування (закорочування) запобіжників або контакторів E-stop для «тимчасового» усунення несправностей [55]. Особливу увагу слід приділяти цілісності ізоляції кабелів, що прокладені рухомими кабель-каналами ножичного механізму. Під час заряджання акумуляторних систем приміщення має інтенсивно вентилюватися для недопущення концентрації вибухонебезпечного водню (для свинцево-кислотних АКБ), а процес зарядки має відбуватися виключно із застосування штатних зарядних станцій, що мають контролери захисту від перезаряду [52], [55].

Вимоги до технічного огляду

Підтримання безпечного технічного стану платформи забезпечується системою планових оглядів, що відповідають вимогам ДСТУ EN ISO 4254-1:2017 [51].

Щозмінний огляд (до початку робіт): оператор зобов'язаний візуально перевірити цілісність зварних швів ножичного механізму та шасі, відсутність підтікань гідравлічної рідини з циліндрів і рукавів високого тиску, надійність фіксації коліс. Критично важливою є перевірка працездатності кнопок аварійного зупинення, зумера заднього ходу та ефективності гальмівної системи

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

на тестовій ділянці. Експлуатація машини з несправною системою блокування запуску рухів при натиснутому E-stop суворо забороняється [52].

Періодичне ТО: включає інструментальний контроль зносу гальмівних колодок, перевірку опору ізоляції електрообладнання та калібрування інклінометрів системи стабілізації.

Безпечна заміна коліс, приводів та акумуляторів

Монтажно-демонтажні роботи важких агрегатів (наприклад, заміна тягової батареї масою понад 100 кг або мотор-колів) повинні виконуватися виключно на горизонтальному майданчику з твердим рівним покриттям (бетон або асфальт, кут ухилу 0°) [53]. Під час піддомкращування платформи:

Машина фіксується стоянковим гальмом.

Під колеса, що не підіймаються, підкладаються противідкатні стопорні колодки, висота яких становить не менше 1/3 діаметра колеса [53].

Піднята частина шасі обов'язково страхується сталевими підставками (козелками) відповідної вантажності; використання лише гідравлічного домкрата для утримання машини категорично заборонено.

Для демонтажу акумуляторних блоків або гідроциліндрів застосовуються гаражні крани або талі, стропальні роботи при цьому виконують фахівці, що пройшли відповідне навчання [53].

Дотримання пожежної безпеки

Умови фруктового саду у сухий період характеризуються підвищеною пожежною небезпекою через накопичення сухої трави, листя та пилу. Для запобігання займанню:

- Мобільна платформа комплектується сертифікованими порошковими або вуглекислотними вогнегасниками, розміщеними у легкодоступних місцях (на рівні шасі та в кошику) [52].

- У процесі щоденного обслуговування механізатор зобов'язаний очищати простір навколо тягових електродвигунів, акумуляторних відсіків та

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

ребер охолодження контролерів від органічних решток, які можуть спалахнути від нагрітих поверхонь.

- Під час виконання ремонтних робіт із застосуванням відкритого вогню або кутових шліфувальних машин (зварювання, різання) безпосередньо на платформі, територія навколо очищується від горючих матеріалів у радіусі не менше 5 метрів, а наявність засобів первинного пожежогасіння перевіряється до початку робіт.

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

4.1. Орієнтовна собівартість розробленої мобільної платформи

Архітектура платформи проектується за принципами модульності та ремонтпридатності з використанням системи ROS 2. Орієнтовна собівартість (виробнича вартість прототипу) розраховується як сума витрат на комплектуючі та оплату праці. У таблиці 4.1. наведено зведений кошторис (курс 40,00 грн/USD).

Таблиця 4.1.

Орієнтовний кошторис витрат на розробку прототипу

Назва компоненту	Кількість	Ціна, грн	Сума (UAH)	Частка (%)
Несуча металева рама	1	14000	14000	8,5%
Електродвигуни коліс	4	8000	32000	19,4%
Акумуляторна батарея	1	26000	26000	15,7%
Система керування	1	14000	14000	8,5%

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ							
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Розроб.		Сачик Д.С.			РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ				Літ.	Арк.	Акрушів	
Перевір.		Ляшко А.П.									52	69
									НУБіП України			
Н. Контр.		Матухно Н.В.										
Затверд.		Ловейкін В.С.										

Датчики (LiDAR, камери)	1	36000	36000	21,8%
Колеса	4	2400	9600	5,8%
Електронні компоненти	1	14000	14000	8,5%
Роботи зі складання	40 год	480/год	19200	11,6%
Інші витрати	1	400	400	0,2%
Разом собівартість:	-	-	165200	100,0%

Собівартість прототипу складає близько 165 200,00 грн. Це в кілька разів нижче за вартість комерційних аграрних роботів на світовому ринку.

Аналіз витрат на виготовлення конструкції

Рама: зварна конструкція з вуглецевої сталі, розрахована на корисне навантаження до 250 кг. Вартість матеріалів та фарбування – 14000 грн.

Електродвигуни коліс: повний привід (4WD) реалізований на 4 безщіткових двигунах (BLDC) з планетарними редукторами. Вартість силової установки – 32000 грн.

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

Акумулятор: LiFePO4 батарея (48 В, 70 А·год) забезпечує 8-12 годин автономної роботи та має ресурс понад 3000 циклів [68]. Вартість – 26000 грн.

Система керування: Обчислювальна база NVIDIA Jetson та мікроконтролери STM32 з інтеграцією ROS 2. Вартість комплекту – 14000 грн.

Датчики: Для 3D-мапінгу (SLAM) використовується 16-канальний LiDAR (наприклад, Leishen C16) [69], стереокамери та IMU-сенсори. Сумарна вартість – 36000 грн.

Колеса: Широкі пневматичні шини з аграрним протектором для мінімізації пошкодження ґрунту. Вартість – 96000 грн.

Електронні компоненти: Драйвери двигунів, DC-DC перетворювачі та промислові водонепроникні роз'єми (IP54). Вартість – 14000 грн.

Роботи: 40 годин інженерної та складальної праці за ставкою \$4800/год. Вартість – 19200 грн.

4.2. Порівняння розробленої платформи з існуючими аналогами на ринку

Для оцінки конкурентоспроможності проведено бенчмаркінг із провідними аграрними та дослідницькими платформами.

Таблиця 4.2.

Порівняльна характеристика з ринковими аналогами

Параметр	Розроблена платформа	Burro [67]	Husky UGV A300 [66]	Thorvald [70]
Вантажопідйомність	До 250 кг	225-680 кг	100 кг	200-250 кг

Максимальна швидкість	1,5-2,0 м/с	~2,6 м/с	2,0 м/с	1,5 м/с
Час автономної роботи	8-10 годин	12-15 годин	4-12 годин	До 10 годин
Власна вага	~80-100 кг	~490 кг	80 кг	150-180 кг
Орієнтовна вартість	~165200 грн	~600000 грн	~560000 грн	~2400000 грн

Розроблена платформа за вантажопідйомністю перевершує Husky UGV та відповідає спеціалізованим роботам (Burro, Thorvald). При цьому капітальні витрати на неї нижчі щонайменше у 3-4 рази порівняно з найдешевшим аналогом.

4.3. Оцінка економічної доцільності впровадження

Модель економічної ефективності базується на радикальному зменшенні втрат робочого часу.

Вхідні дані моделі:

- $W_{год}$ – вартість години праці (120 грн/год).
- N – кількість робітників у бригаді (3 особи).
- H – тривалість зміни (8 годин).
- D – кількість робочих днів за сезон (100 днів).

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

Базовий сценарій (без використання робота):

Фонд оплати праці бригади за сезон:

$$C_{\text{руч}} = N \times W_h \times H \times D; \quad (4.1)$$

$$C_{\text{руч}} = 3 \times 120 \times 8 \times 100 = 288,000 \text{ грн};$$

Інноваційний сценарій:

Використання робота скорочує непродуктивний час на 60% та підвищує інтенсивність праці на 10%, сукупно збільшуючи продуктивність бригади на 28% [64]. Економія або згенерований додатковий дохід за сезон складає:

$$E_{\text{праці}} = C_{\text{руч}} \times 0,28 = 288000 \times 0,28 = 80640 \text{ грн/рік} \quad (4.2)$$

Операційні витрати платформи:

- Електроенергія ($C_{\text{енерг}}$): 24 грн/день $\times$ 100 днів = 2,400 грн/рік.
- Технічне обслуговування ($C_{\text{обсл}}$), 5% від вартості:

$$C_{\text{обсл}} = 165,200 \times 0,05 = 8,620 \text{ грн/рік}. \quad (4.3)$$

Чиста операційна економія (ЧЕ):

$$\text{ЧЕ} = E_{\text{праці}} - (C_{\text{енерг}} + C_{\text{обсл}}) \quad (4.4)$$

$$\text{ЧЕ} = 80640 - (2400 + 8620) = 69980 \text{ грн/рік}$$

Показники інвестиційної привабливості:

- Простий термін окупності (PP):

$$PP = \frac{I_0}{\text{ЧЕ}} = \frac{165200}{69980} \approx 2,36 \text{ року} \quad (4.5)$$

- Рентабельність інвестицій (ROI) за 5 років:

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

$$ROI = \left(\frac{ЧЕ \times 5 - I_0}{I_0} \right) \times 100\% \quad (4.6)$$

$$ROI = \left(\frac{349900 - 165200}{165200} \right) \times 100\% \approx 111,8\%$$

Очікуваний економічний ефект від використання платформи

Зменшення втрат урожаю: плавне транспортування делікатних фруктів зберігає їхній товарний вигляд (клас "Преміум"), що генерує додатковий дохід.

Оптимізація логістики простору: здатність платформи розвертатися на місці мінімізує потребу у широких розворотних смугах, збільшуючи корисну площу насаджень на 5-7%.

Мінімізація впливу на ґрунт: легка вага робота не ущільнює ґрунт, а відмова від тракторів з ДВЗ зменшує витрати на дизельне паливо та сприяє екологізації (Zero Emissions).

Подолання кадрової кризи: делегування логістики машинам дозволяє меншій кількості людей збирати більший обсяг врожаю вчасно, страхуючи бізнес від втрат.

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

ВИСНОВКИ

Автоматизація внутрішньосадової логістики сьогодні стає одним із головних чинників підвищення ефективності аграрного сектору. Сучасні фермерські господарства все більше прагнуть відмовитися від використання традиційної важкої техніки, яка сильно ущільнює ґрунт і пошкоджує дерева у вузьких міжряддях. Створення невеликих автономних колісних шасі дозволяє успішно замінити важку та одноманітну ручну працю вантажників. Поєднання сучасних безпілотних датчиків, інтелектуальних систем керування та точних механічних приводів дає можливість створити надійний транспортний засіб для дбайливого переміщення делікатних плодів безпосередньо від місця збору до складських приміщень.

Переваги запропонованої конструкції мобільної платформи полягають у її високій маневреності, прохідності та повній технічній безпеці. Спеціально підібрані розміри вантажної площадки під формат європалети забезпечують зручне розміщення чотирьох ящиків із фруктами загальною масою 88 кг. Завдяки повнопривідній колісній схемі та використанню ефективних безколекторних електродвигунів Dunkermotoren із планетарними редукторами, робот демонструє стабільну роботу навіть у складних умовах — на пухкому садовому ґрунті та ухилах до 10°. Енергозабезпечення від безпечного LiFePO₄ акумулятора гарантує повну автономність протягом усього 8-годинної робочої зміни. Інтегрована система безпеки під управлінням операційного середовища ROS 2, що включає LiDAR, камери, автоматичне обмеження швидкості та датчики нахилу понад 4,5°, повністю захищає персонал від можливих нещасних випадків.

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Сачик Д.С.			ВИСНОВКИ		
Перевір.		Ляшко А.П.					
Н. Контр.		Матухно Н.В.					
Затверд.		Ловейкін В.С.					
						Літ.	Арк.
							58
						Акрушіє	
						69	
						НУБіП України	

Економічні розрахунки підтверджують високу доцільність впровадження такої розробки, оскільки собівартість виготовлення прототипу (165 200 грн) є значно нижчою за імпортні аналоги. Зменшення втрат від пошкодження фруктів при перевезенні та підвищення продуктивності збиральної бригади на 28% забезпечують швидку окупність проекту всього за 2,36 року. У майбутньому подібні мобільні системи мають потенціал для повної інтеграції у загальні диспетчерські системи управління розумними фермами за допомогою промислових контролерів (ПЛК) та систем SCADA. Застосований у роботі інженерний підхід демонструє перспективність створення доступної вітчизняної агроробототехніки для розвитку точного землеробства та модернізації українського агровиробництва.

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Robotic Fruit Picker Market - Global Industry Analysis and Forecast : website. URL: <https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/global-robotic-fruit-picker-market/21897/> (дата звернення: 14.03.2026).
2. Fruit Picking Robots Market Size, Trends & Forecast, 2026-2033 : website. URL: <https://www.coherentmarketinsights.com/market-insight/fruit-picking-robots-market-4531> (дата звернення: 02.04.2026).
3. NRI Co-Robotic Harvesting Orchard Platform / Stavros Vougioukas ; UC Davis : website. URL: <https://faculty.engineering.ucdavis.edu/vougioukas/research/projects/co-robotic-harvesting-orchard-platform/> (дата звернення: 22.03.2026).
4. Research Progress on Path Planning and Tracking Control Methods ... / MDPI : website. URL: <https://www.mdpi.com/2077-0472/15/18/1917> (дата звернення: 18.04.2026).
5. Mapping recent trends in artificial intelligence research for sustainable agriculture: a bibliometric and systematic review : (PDF) / ResearchGate : website. URL: https://www.researchgate.net/publication/403712884_Mapping_recent_trends_in_artificial_intelligence_research_for_sustainable_agriculture_a_bibliometric_and_systematic_review (дата звернення: 05.03.2026).
6. John Deere Unveils Autonomous Orchard Tractor at CES 2025: Revolutionizing High-Value Crop Farming / Green Industry Pros : website. URL: <https://www.greenindustrypros.com/mowing-maintenance/robotics/article/22948775/truck1eu-john-deere-unveils-autonomous-orchard-tractor-at-ces-2025-revolutionizing-highvalue-crop-farming> (дата звернення: 29.04.2026).

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ			
Розроб.		Сачик Д.С.						
Перевір.		Ляшко А.П.						
Н. Контр.		Матухно Н.В.						
Затверд.		Ловекін В.С.						
					Літ.	Арк.	Акрушів	
							60	69
					НУБіП України			

7. Autonomy - Our Company & Purpose / John Deere : website. URL: <https://about.deere.com/en-us/our-company-and-purpose/technology-and-innovation/autonomy> (дата звернення: 11.03.2026).

8. Integrating Remote Sensing and Autonomous Robotics in Precision Agriculture: Current Applications and Workflow Challenges / MDPI : website. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4395/15/10/2314> (дата звернення: 07.04.2026).

9. Pre- and Postharvest Determinants, Technological Innovations and By-Product Valorization in Berry Crops: A Comprehensive and Critical Review / MDPI : website. URL: <https://www.mdpi.com/2311-7524/12/1/19> (дата звернення: 25.03.2026).

10. Vibration Mitigation in the Transport of Fruit Boxes Using 3D-Printed Devices / MDPI : website. URL: <https://www.mdpi.com/2077-0472/15/2/131> (дата звернення: 14.04.2026).

11. Vibration Mitigation in the Transport of Fruit Boxes Using 3D-Printed Devices / Helvia UCO : website. URL: <https://helvia.uco.es/handle/10396/32928> (дата звернення: 30.03.2026).

12. Burro / Burro : website. URL: <https://burro.ai/burro/> (дата звернення: 03.04.2026).

13. Thorvald platform / Saga Robotics : website. URL: <https://www.sagarobotics.com/thorvald-platform> (дата звернення: 19.03.2026).

14. John Deere Reveals New Autonomous Machines and Technology at CES 2025 / John Deere Ireland : website. URL: <https://www.deere.ie/en-ie/our-company/news/autonomous-machines-and-technology-at-ces> (дата звернення: 21.04.2026).

15. About / Saga Robotics : website. URL: <https://www.sagarobotics.com/about> (дата звернення: 09.03.2026).

16. Thorvald Closes Landmark Season / Saga Robotics : website. URL: <https://www.sagarobotics.com/post/thorvald-closes-landmark-season> (дата звернення: 13.04.2026).

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

17. Agriculture, Volume 16, Issue 4 (February-2 2026) – 100 articles / MDPI : website. URL: <https://www.mdpi.com/2077-0472/16/4> (дата звернення: 28.03.2026).

18. Vehicle for Transporting Tools on Uneven Terrain / Praise Worthy Prize : website. URL: [https://praiseworthyprize.org/jsm/index.php?journal=ireme&page=article&op=viewFile&path\[\]=25381&path\[\]=pdf_807](https://praiseworthyprize.org/jsm/index.php?journal=ireme&page=article&op=viewFile&path[]=25381&path[]=pdf_807) (дата звернення: 10.04.2026).

19. How to Calculate Motor Torque for Mobile Robots | Step-by-Step / DFRobot Wiki : website. URL: https://wiki.dfrobot.com/How_to_Calculate_the_Motor_Torque_for_a_Mobile_Robot (дата звернення: 17.03.2026).

20. How can I calculate the power and torque required for the motor on a wheeled robot/vehicle? / Engineering Stack Exchange : website. URL: <https://engineering.stackexchange.com/questions/31501/how-can-i-calculate-the-power-and-torque-required-for-the-motor-on-a-wheeled-robot> (дата звернення: 04.04.2026).

21. Robot Torque Calculations for Stability : PDF / Scribd : website. URL: <https://www.scribd.com/document/188850880/mathcad-general> (дата звернення: 26.03.2026).

22. Compare Agriculture Robots / Ducksize : website. URL: <https://www.ducksize.com/compare-agriculture-robots> (дата звернення: 16.04.2026).

23. Development of a Quadruped Robot System for Load-Carrying Support in Orchard Operations / Scilit : website. URL: <https://www.scilit.com/publications/0777ba019a5292ed161983a59fabe253> (дата звернення: 31.03.2026).

24. Improving mobile robot stability on uneven terrain through vibration monitoring techniques / The Robot Report : website. URL: <https://www.therobotreport.com/improving-mobile-robot-stability-on-uneven-terrain-through-vibration-monitoring-techniques/> (дата звернення: 24.04.2026).

25. Construction of the Robo-Farmer autonomous robotic platform / EU CAP Network : website. URL: <https://eu-cap-network.ec.europa.eu/good->

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

practice/construction-robo-farmer-autonomous-robotic-platform_en (дата звернення: 06.03.2026).

26. Road transportation fruit transportation box / Eureka ; Patsnap : website. URL: <https://eureka.patsnap.com/patent-CN111086765A> (дата звернення: 12.04.2026).

27. Роботизована система накривання лотків кришками | Вакуумний робот-маніпулятор / Капелоу : вебсайт. URL: <https://kapelou.com/product/systema-nakryvannia-lotkiv> (дата звернення: 23.03.2026).

28. Editor's picks: top robots from World Ag Expo / The Robot Report : website. URL: <https://www.therobotreport.com/editor-picks-top-robotics-from-world-ag-expo/> (дата звернення: 27.04.2026).

29. Wheel torque control for a rough terrain rover / Research Collection ; ETHZ : website. URL: <https://www.research-collection.ethz.ch/bitstreams/7e86975e-410e-40b9-8701-5ede0f84e584/download> (дата звернення: 15.03.2026).

30. ДСТУ EN ISO 18497:2020. Машини та трактори сільськогосподарські. Безпека високоавтоматизованих сільськогосподарських машин. Принципи проектування (EN ISO 18497:2018, IDT; ISO 18497:2018, IDT). [Чинний від 2021-01-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2021. 28 с.

31. Поліщук М. М., Ткач М. М. Робототехнічні системи та комплекси: мобільні роботи довільної орієнтації : підручник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2015. 382 с.

32. Дубінін Н. В. Мобільна автоматизована платформа : магістерська дис. ... 131 Прикладна механіка / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ, 2024. 69 с.

33. Di Maria E., Ishii K. Soil Compaction and Rolling Resistance Evaluation of a Locomotion System with an Adjustable Contact Patch for a Grape Transporting Robot. Journal of Robotics, Networking and Artificial Life. 2019. Vol. 6, no. 3. P. 148–151.

34. Wong J. Y. Theory of Ground Vehicles. 5th ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2022. 624 p.

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

35. Li H. Analysis of Off-Road Tire-Soil Interaction through Analytical and Finite Element Methods : PhD thesis. Kaiserslautern : Technischen Universität Kaiserslautern, 2013. 145 p.

36. Technical Specifications / European Pallet Association e.V. (EPAL) : website. URL: <https://www.epal-pallets.org> (дата звернення: 14.03.2026).

37. VDI 4500. Standardized reusable plastic crates for logistics. Düsseldorf : VDI, 2018. 42 p.

38. ISO 11228-1:2021. Ergonomics – Manual handling – Part 1: Lifting and carrying. Geneva : ISO, 2021. 54 p.

39. Discover Mobil Robot Battery AGV/AMR 24V/48V / Wiferion : website. URL: <https://www.wiferion.com/en/products/discover-mobil-robot-battery-agv-amr-24v-48v/> (дата звернення: 05.04.2026).

40. Іванов Е. О. Коефіцієнти зчеплення ти ведучого механізму з ґрунтом та опору кочення f коліс трактора. Київ : ДУ «НМЦ ВФПО», 2020. 12 с.

41. Rolling resistance and its ag tire impact / Maxam Tire : website. URL: <https://maxamtire.com/rolling-resistance-and-its-ag-tire-impact/> (дата звернення: 22.03.2026).

42. BG 75x75 dPro PN/EC/EI Brushless DC Motor Technical Manual / Dunkermotoren GmbH. Bonndorf, 2023. 24 p.

43. High-torque planetary gearboxes GP56 Series / Nanotec Electronic GmbH : website. URL: <https://www.nanotec.com> (дата звернення: 19.04.2026).

44. PLG 75 Planetary Gearboxes Catalog / Dunkermotoren GmbH. Bonndorf, 2023. 18 p.

45. The Farmers Guide To Agricultural Robotics / BKT Tires : website. URL: <https://www.bkt-tires.com/bkt-blog/insights-forecasts/the-farmers-guide-to-agricultural-robotics-what-farmers-need-to-know-about-agricultural-robots-in-the-eu/> (дата звернення: 02.04.2026).

46. Huang C. S. et al. A lithium-ion batteries fault diagnosis method for accurate coulomb counting state-of-charge Estimation. Journal of Electrical Engineering & Technology. 2024. Vol. 19, no. 1. P. 433–442.

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

47. Gonzalez-de-Santos P. et al. Stability analysis of a 4WD mobile robot on a slope. Robotics and Autonomous Systems. 2020. Vol. 124. P. 103367.

48. EN 1993-1-1:2005. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels : CEN, 2005. 91 p.

49. Budynas R. G., Nisbett J. K. Shigley's Mechanical Engineering Design. 11th ed. New York : McGraw-Hill Education, 2019. 1088 p.

50. ДСТУ EN ISO 12100:2016. Безпечність машин. Загальні принципи проектування. Оцінювання ризиків та зменшення ризиків (EN ISO 12100:2010, IDT; ISO 12100:2010, IDT). [Чинний від 2018-07-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=71627 (дата звернення: 11.03.2026).

51. ДСТУ EN ISO 4254-1:2017. Сільськогосподарські машини. Вимоги щодо безпеки. Частина 1. Загальні вимоги (EN ISO 4254-1:2015, IDT; ISO 4254-1:2013, IDT). [Чинний від 2019-01-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=75911 (дата звернення: 05.04.2026).

52. НПАОП 01.0-1.02-18. Правила охорони праці у сільськогосподарському виробництві : затверджено Наказом Міністерства соціальної політики України від 29.08.2018 № 1240. URL: http://old.fort.kharkiv.com/descr_pravila-ohoroni-prac%B3-u-s%B3lskogospodarskomu-virobnictv%B3-2018.htm (дата звернення: 26.03.2026).

53. НПАОП 0.00-1.75-15. Правила охорони праці під час вантажно-розвантажувальних робіт : затверджено Наказом Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 19.01.2015 № 21. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=60765 (дата звернення: 17.04.2026).

54. ДСТУ 7237:2011. Система стандартів безпеки праці. Електробезпека. Загальні вимоги та номенклатура видів захисту. [Чинний від 2011-08-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2011. URL:

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=30045 (дата звернення: 02.04.2026).

55. ДСТУ EN 60204-1:2015. Безпечність машин. Електрообладнання машин. Частина 1. Загальні вимоги (EN 60204-1:2006; A1:2009; AC:2010, IDT). [Чинний від 2017-01-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=68394 (дата звернення: 22.03.2026).

56. ISO 18497:2018. Agricultural machinery and tractors – Safety of highly automated agricultural machines – Principles for design. Geneva : International Organization for Standardization, 2018. URL: <https://webstore.ansi.org/standards/iso/iso184972018> (дата звернення: 29.04.2026).

57. ISO 16231-1:2013. Self-propelled agricultural machinery – Assessment of stability – Part 1: Principles. Geneva : International Organization for Standardization, 2013. URL: https://webstore.ansi.org/preview-pages/ISO/preview_ISO+16231-1-2013.pdf (дата звернення: 08.03.2026).

58. Johnson P. W., Thamsuwan O. Ergonomic Evaluation of Emerging Mobile Platform Technologies in the Tree Fruit Industry. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting. 2015. Vol. 59, Issue 1. P. 1252–1256. URL: <https://stacks.cdc.gov/view/cdc/207698> (дата звернення: 14.04.2026).

59. Harvesting fruits using a mobile platform - A case study applied to citrus. Engenharia Agrícola. 2015. URL: <https://www.scielo.br/j/eagri/a/9GYtHGPNGMcjYwMBm5DVLjM/> (дата звернення: 20.03.2026).

60. Automatic fruit picking technology: a comprehensive review of research advances / J. Zhang et al. Artificial Intelligence Review. 2024. Vol. 57. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10462-023-10674-2> (дата звернення: 16.03.2026).

61. Economics of Autonomous Equipment for Arable Farms / J. Lowenberg-DeBoer et al. Precision Agriculture. 2021. Vol. 22. P. 1999–2032. URL:

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

<https://link.springer.com/article/10.1007/s11119-021-09822-x> (дата звернення: 04.04.2026).

62. Evaluation of labor savings and economic efficiency of transport-assistant robot in mandarin orchard / K. Hayashi et al. Agricultural Research on Front Line. 2023. Vol. 59, no. 4. P. 188–195. URL: https://www.jstage.jst.go.jp/article/arfe/59/4/59_188/_html/-char/en (дата звернення: 21.03.2026).

63. A strawberry harvest-aiding system with crop-transport co-robots / C. Peng et al. arXiv preprint. 2021. arXiv:2107.13063. URL: <https://arxiv.org/abs/2107.13063> (дата звернення: 12.04.2026).

64. Economic and environmental benefits of digital agricultural technologies in crop production: A review / G. Papadopoulos et al. Smart Agricultural Technology. 2024. Vol. 7. P. 100441. URL: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100441> (дата звернення: 29.03.2026).

65. ShapeCostTUM: A calculation tool for field geometry dependent cultivation and transport costs / M. Ptacek et al. ; Technical University of Munich : website. URL: <https://portal.fis.tum.de/de/publications/shapecostsuptumsup-a-calculation-tool-for-field-geometry-dependen/> (дата звернення: 07.04.2026).

66. Husky UGV A300 Specifications / Clearpath Robotics : website. URL: <https://clearpathrobotics.com/husky-a300-unmanned-ground-vehicle-robot/> (дата звернення: 25.04.2026).

67. Autonomous Mobile Robots for Agriculture - Burro Grande / Burro : website. URL: <https://burro.ai/burro-grande/> (дата звернення: 18.03.2026).

68. Agricultural robots and high capacity batteries for all-day operation / Large Battery : website. URL: <https://www.large-battery.com/uk/blog/agricultural-robots-high-capacity-batteries-all-day-operation/> (дата звернення: 09.04.2026).

69. LS 16 Channel, 150m LiDAR C16-151B / RobotShop : website. URL: <https://www.robotshop.com/products/ls-16-channel-150m-lidar-c16-151b-3-cm> (дата звернення: 22.04.2026).

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

70. Thorvald Autonomous Robot Platform / Saga Robotics : website. URL:
<https://www.sagarobotics.com/thorvald-platform> (дата звернення: 02.04.2026).

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТКИ

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДОДАТКИ			
Розроб.		Сачик Д.С.						
Перевір.		Ляшко А.П.						
Н. Контр.		Матухно Н.В.						
Затверд.		Ловекін В.С.			НУБіП України			
					Літ.	Арк.	Акрушів	
						69	69	