

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерних технологій та професійної освіти
Кафедра агроінженерії

Допущено до захисту
«__» _____ 2026 р.
Зав. кафедри д.т.н., професор
(науковий ступінь, вчене звання)
Володимир ДІДУР
(підпис) (ініціали, прізвище)

Кваліфікаційна робота (дипломний проект)

перший (бакалаврський)
(назва освітнього рівня)

тема проекту: «Удосконалення базової конструкції візка для
перевезення піддонів по пересіченій місцевості.»

Виконав: студент 3 курсу, групи 32 к -ім
освітньої програми бакалавр
спеціальності 208 «Агроінженерія»
Рогожа Данило Васильович
(прізвище та ініціали)

Керівник канд. с-г наук, доцент
Головатюк Анатолій Анатолійович
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерних технологій та професійної освіти

Кафедра агроінженерії

Освітня програма _____ «Бакалавр» _____

Спеціальність _____ 208 «Агроінженерія» _____

(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри

_____ Володимир ДІДУР

« ____ » _____ 2026 р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ)

Рогожі Данилу Васильовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту **«Удосконалення базової конструкції візка для перевезення піддонів по пересіченій місцевості.»**

керівник проекту Головатюк Анатолій Анатолійович, канд. с-г наук

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від

“ 08 ” _____ травня _____ 2026 р. № 01-06/167

2. Строк подання студентом проекту _____ 18.05.2026 р. _____

3. Вихідні дані до проекту літературні джерела, технологічні та технічні рішення, методичні вказівки, методики.

4. Перелік питань, які потрібно розробити: Вступ. 1. Аналіз стану питання за темою дипломного проекту. 2. Теоретичні та/або експериментальні дослідження за темою дипломного проекту. 3. Охорона праці. 4 . Обґрунтування досягнутих результатів. Загальні висновки. Список використаних джерел.

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Прокопенко Е.В., доцент		

7. Дата видачі завдання 26 вересня 2025 року*КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН*

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту	Строк виконання етапів проекту	При- мітка
1.	Підбір та вивчення літературних джерел, підготовка вступу	15.10.2025 р.	
2.	Розділ 1. Аналіз стану досліджуваного питання	19.11.2025 р.	
3.	Розділ 2. Експериментальні дослідження	18.12.2025 р.	
4.	Розділ 3. Охорона праці	12.02.2026 р.	
5.	Розділ 4. Економічне обґрунтування проекту	09.03.2026 р.	
6.	Виконання ілюстративної частини проекту	15.04.2026 р.	
7.	Представлення проекту керівнику на перевірку	18.05.2026 р.	

Студент _____ Рогожа Д. В.
 (підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту _____ Головатюк А.А.
 (підпис) (прізвище та ініціали)

Зміст

ВСТУП	5
1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ЗА ТЕМОЮ	
1.1 Огляд програмного забезпечення	
1.2 Огляд ринку та існуючих рішень	8
1.3 Електродвигуни у маточині колеса	10
2. ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	
2.1 Технічне завдання та варіанти конструктивних рішень	12
2.2 Розробка моделі транспортного засобу. Проектування базової конструкції.	15
2.3 Розрахунок необхідної потужності електродвигуна у маточині колеса. Розрахунок сили тяжіння на підйомі	20
2.4 Вибір електродвигунів та акумуляторного блоку. Вибір електродвигунів у маточині колеса	21
2.5 Міцнісна симуляція	24
3. ОХОРОНА ПРАЦІ	
3.1 Загальні вимоги безпеки	
3.2 Вимоги до оператора та інструктаж	
3.3 Безпека електричної системи	29
3.4 Вимоги до умов роботи та технічного обслуговування	30
4. ОБҐРУНТУВАННЯ ДОСЯГНУТИХ РЕЗУЛЬТАТІВ	
4.1 Функціонування та управління транспортним засобом	31
4.2 Відповідність технічному завданню	32
ВИСНОВКИ	34
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	36
ДОДАТОК	38

ВСТУП

Сферою дипломної роботи є транспортування піддонів на території ремонтних майстерень, що має вирішальне значення для ефективного та безпечного виконання робіт. Йдеться про різновид транспортування, що передбачає переміщення різноманітних матеріалів, інструментів на піддонах, нерідко в умовах неупорядкованого робочого середовища. Роботи здійснюються у кілька етапів, кожен із яких висуває різні вимоги до транспортування та розміщення матеріалів. Серед найпоширеніших матеріалів, які необхідно переміщувати на ремонтному майданчику, – різні види габаритних деталей сільськогосподарських машин та агрегатів, тощо. Характерною особливістю ремонтних майданчиків є нерівний рельєф та обмежений простір, що унеможлиблює роботу більшості відомих на сьогодні машин.

На практиці нерідко виникають ситуації, коли прилегла до споруд територія не впорядкована і тому важкодоступна для великогабаритних машин, призначених для перевезення піддонів із габаритними деталями. Більшість машин для транспортування важких піддонів розрахована на зручний та рівний рельєф. Однак на практиці такі умови трапляються рідко. Проблема особливо гостро постає під час розвантаження/навантаження неможливо переміщати ближче до місця проведення робіт через перешкоди або невідповідний рельєф. У виробничій практиці існує безліч машин, які транспортують матеріали від виробників до ремонтних баз, проте через свої габарити вони обмежені у русі впорядкованою підосною – дорогами та під'їздами до об'єктів.

Як правило, як альтернативне рішення використовуються машини з телескопічною стрілою, які, однак, також обмежені довжиною стріли та простором, необхідним для переміщення піддона. Прилегла до об'єктів територія буває унеможлиблює транспортування важкою технікою – остання руйнує облаштований рельєф своєю вагою і розмірами. Таку

проблему часто вирішують ручним транспортуванням матеріалів, що є фізично виснажливим і часово неефективним. Саме тому було прийнято рішення сконструювати транспортний засіб, який буде меншим за масою та габаритами і тому здатним переміщати піддони складним та важкодоступним рельєфом.

Мета та завдання дипломної роботи: Головною метою дипломної роботи є конструювання транспортного засобу для перевезення важких піддонів по пересіченій місцевості. Транспортний засіб дозволить доставляти матеріали безпосередньо до місця проведення робіт, знижуючи фізичне навантаження на працівників та підвищуючи продуктивність праці. Завдяки компактній конструкції він буде легшим і зможе переміщатися вже впорядкованою територією. Основне призначення транспортного засобу – полегшити перевезення піддонів із деталями безпосередньо до місця їх використання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз існуючих конструкцій транспортних засобів для перевезення піддонів;
- обґрунтувати вибір конструктивної схеми транспортного засобу;
- розробити тривимірну модель транспортного засобу у середовищі SolidWorks;
- виконати розрахунок необхідної потужності електродвигунів;
- підібрати відповідні електродвигуни та акумуляторний блок;
- провести міцнісну симуляцію конструкції та проаналізувати результати.

Обмеження та припущення

Під час проектування конструкції транспортного засобу важливо дотримуватися вимог до його вантажопідйомності. При виборі конструкції необхідно враховувати загальну масу транспортного засобу, оскільки передбачається, що він транспортуватиметься на причепі

вантажопідйомністю 750 кг. Тому слід ретельно проектувати та підбирати матеріали й комплектуючі, щоб загальна маса транспортного засобу не перевищувала цього обмеження. При використанні транспортних засобів безпосередньо поблизу людей особливу увагу необхідно приділяти безпеці персоналу, який керуватиме засобом. Конструкція повинна забезпечувати максимальну безпеку під час експлуатації, особливо в складних умовах – на нерівному або неупорядкованому рельєфі.

Важливо зберігати якомога більшу стабільність транспортного засобу під час руху, що вимагає точного визначення центру мас, ширини колісної бази та прохідності. Одним із ключових конструктивних рішень є використання електричного приводу. При цьому слід ретельно підібрати відповідний електродвигун, акумулятори та інші компоненти, що забезпечують достатню потужність та запас ходу транспортного засобу.

Методи дослідження.

Для вирішення поставлених завдань використано такі методи дослідження: аналіз наукової та технічної літератури, аналіз ринкових рішень, комп'ютерне тривимірне моделювання у середовищі SolidWorks, аналітичний розрахунок необхідної потужності приводу, метод скінченних елементів для оцінки міцності несучої конструкції.

1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ЗА ТЕМОЮ

1.1 Огляд програмного забезпечення

Для моделювання використовувалася програма SolidWorks – система автоматизованого проектування, що розробляється компанією Dassault Systèmes. Це програма, яка застосовується для тривимірного моделювання у машинобудуванні та промисловому проектуванні. Вона дозволяє створювати точні тривимірні моделі та збірки, містить розширені функції для моделювання поверхонь, об'ємні моделі та роботу з листовим металом. Крім того, програма забезпечує підготовку технічної документації, параметричне моделювання та безліч інших функцій, корисних у процесі проектування. Програмне забезпечення також включає вбудовані інструменти для проведення різноманітних симуляцій і аналізів: аналіз навантажень, потоків, теплових властивостей і динамічних змін. У рамках конструювання транспортного засобу було використано широкий спектр функцій для моделювання, симуляцій і підготовки технічної документації.

1.2 Огляд ринку та існуючих рішень

На ринку існує дуже широкий асортимент різноманітних транспортних засобів для перевезення піддонів, проте лише деякі з них придатні для роботи на пересіченій місцевості. Як перший приклад розглянемо ручний палетний візок від постачальника Aj proizvodi з вантажопідйомністю 1000 кг і ручним регулюванням виделок. Транспортний засіб придатний для нерівної та шорсткої поверхні. Ширина транспортного засобу – 1670 мм, маса – 210 кг (рис. 1.1).



Рис. 1.1 – Палетний навантажувач компанії Aj proizvodí.

Більшість продуктів, доступних на ринку, є подібними до наведеної конструкції. Другий розглянутий зразок виробляється у США. Він приводиться в дію електродвигуном, має ширину 1625 мм і масу 511 кг, оснащений автоматичним підйомом виделок і вантажопідйомністю 900 кг. З повним навантаженням транспортний засіб здатний долати нахил до 3 градусів (рис. 1.2).



Рис. 1.2 – Електричний палетний навантажувач компанії Vestil

Проведений аналіз ринкових рішень дозволяє зробити висновок, що більшість наявних транспортних засобів для перевезення піддонів призначена для роботи на впорядкованих поверхнях. Вони є надто важкими та громіздкими для застосування на складному ремонтному рельєфі, що підтверджує актуальність розробки нового концептуального рішення.

1.3 Електродвигуни у маточині колеса

Останнім часом використання електродвигунів у маточині колеса на ринку значно зросло. Ці двигуни дедалі активніше стають ключовим компонентом сучасних електровелосипедів та інших електричних транспортних засобів, зокрема електросамокатів. Двигуни встановлюються безпосередньо у маточину колеса, що суттєво спрощує використання, скорочує потреби в обслуговуванні та підвищує ефективність роботи. Інтеграція двигуна є простою, оскільки такі двигуни не потребують систем передачі потужності – ланцюгів, шестерень або пасів – що мінімізує потребу в технічному обслуговуванні.

Однією з головних переваг електродвигунів у маточині колеса є їхня ефективність, адже двигун безпосередньо приводить колесо в рух. Завдяки постійному прогресу технологій електродвигунів і акумуляторів вони стають все надійнішими, ефективнішими, потужнішими та легшими [3]. В Словенії розробкою та виробництвом електродвигунів займаються дві компанії – Elaphe та GEM motors (рис. 1.3).



Рис. 1.3 – Електродвигун у маточині колеса компанії GEM motors

2. ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Технічне завдання та варіанти конструктивних рішень

Технічне завдання – документ, що містить і детально визначає вимоги та технічні специфікації, яким повинен відповідати виріб. Воно є одним із ключових документів у процесі розробки, оскільки супроводжує весь процес – від початкової ідеї та концепцій до повного циклу розробки. Зазвичай технічне завдання є одним із перших підготовлених документів і в подальшому не повинно зазнавати змін. Воно формулюється з метою визначення орієнтовних цілей, пріоритетів і технічних специфікацій, яких повинен досягти кінцевий виріб.

При складанні технічного завдання важливо чітко визначити, які вимоги повинні бути обов’язково виконані, які – щонайменше мінімально, а які є лише бажаними і не впливають на функціонування виробу. Вимоги поділяються на три основні типи:

- Б (безумовні) – вимоги, яким виріб повинен відповідати в обов’язковому порядку;
- М (мінімальні) – вимоги, що повинні виконуватись хоча б на мінімальному рівні;
- Б/Ж (бажані) – вимоги, що не є обов’язковими для функціонування виробу, однак їхнє виконання покращує якість виробу.

Перед проектуванням транспортного засобу було складено технічне завдання з усіма вимогами, обмеженнями та технічними специфікаціями (табл. 2.1).

Варіанти конструктивних рішень

Перед проектуванням транспортного засобу було підготовлено три альтернативні конструктивні рішення для перевезення піддонів по пересіченій місцевості.

Таблиця 2.1 – Технічне завдання

Вимога	Тип вимоги
Максимальна маса транспортного засобу 750 кг	М
Вантажопідйомність не менше 1300 кг	М
Електричний привід	Б/Ж
Транспортування засобу за посвідченням водія категорії В	Б
Естетичний вигляд	Б/Ж
Цінова доступність	Б/Ж
Запобігання руйнуванню рельєфу	Б
Можливість транспортування стандартних європіддонів	Б

Перше рішення – транспортний засіб на гусеничному ході. Використання гусениць дозволило б підвищити вантажопідйомність і стабільність транспортного засобу, забезпечуючи відмінне зчеплення з поверхнею та надійну роботу в складних умовах. Водночас упровадження гусениць суттєво збільшило б масу транспортного засобу, а під час повороту могло б пошкоджувати рельєф (рис. 2.1).



Рис. 2.1 – Варіант конструктивних рішень транспортного засобу

Друге рішення – транспортний засіб на чотирьох колесах. Така схема також забезпечує відмінну стабільність, проте значно обмежує

маневреність та можливість повороту і транспортування у вузьких місцях (рис. 2.2).



Рис. 2.2 – Варіант конструктивних рішень транспортного засобу

Третє рішення – транспортний засіб на трьох колесах. Завдяки незначним швидкостям транспортування вантажопідйомність залишається достатньою. Зменшення маси транспортного засобу дозволяє перевозити його причепом вантажопідйомністю до 750 кг. Завдяки одному задньому колесу транспортний засіб може маневрувати у надзвичайно вузьких просторах. При цьому не потрібен складний механізм для переміщення заднього колеса – достатньо простої рукоятки (рис. 2.3).



Рис. 2.3 – Варіант конструктивних рішень транспортного засобу

З огляду на наші вимоги та обмеження було обрано третє рішення – транспортний засіб на трьох колесах. Воно найкраще відповідає поставленим цілям: легше та компактніше за перші два, при цьому суттєво не поступаючись їм у вантажопідйомності та забезпечуючи достатню стабільність. Транспортний засіб здатний маневрувати і перевозити піддони у вузьких ділянках майданчика, не руйнуючи рельєф під час руху та поворотів – що є принципово важливим на вже впорядкованих ділянках.

3.2 Розробка моделі транспортного засобу. Проектування базової конструкції.

Проектування розпочато з аналізу технічного завдання, де зазначені обмеження та припущення, яким повинен відповідати виріб: максимальна маса і максимальний розмір цілого засобу, щоб його можна було транспортувати причепом вантажопідйомністю 750 кг. Усі важливі відомості та припущення враховано при проектуванні транспортного засобу. З огляду на передбачене призначення – перевезення важких піддонів – взято до уваги розміри європіддона. Спираючись на відомі дані про розміри європіддонів і максимальні габарити транспортного засобу, розпочато проектування конструкції.

При конструюванні транспортного засобу прагнули знайти якнайкраще поєднання достатньої вантажопідйомності і мінімальної маси конструкції. Конструкцію складено з круглих і прямокутних профілів із доданими елементами для кріплення всіх інших частин транспортного засобу. Усі деталі, крім профілів, виготовлено на замовлення і не є стандартними. Щодо методу з'єднання: вибір здійснювався між нероз'ємним та роз'ємним з'єднанням – зварюванням і болтовими кріпленнями. Обрано повністю зварну базову конструкцію, насамперед через складність застосування інших методів з'єднання до поточної форми конструкції [1].

Підйомна система та гідравлічний привід. У програмному пакеті SolidWorks розроблено модель конструкції для підйому та опускання піддонів. Конструкція повинна бути достатньо міцною, щоб без проблем витримувати передбачену масу піддона з деталями – 1300 кг. Для підйому вантажу застосовано гідравлічну систему. Систему складено з комбінованого гідравлічного вузла, що включає гідравлічний насос GR.1 та електродвигун потужністю 1,6 кВт. До системи підключено гідравлічний циліндр FORK 70/40-250, що забезпечує підйом і опускання виделок [2]. Уся гідравлічна система постачається компанією ROSI teh d.o.o. (рис. 2.4).



Рис. 2.4 — Гідравлічний вузол насоса GR.1

При конструюванні враховано розміри піддонів, а центр мас намагалися перенести якомога нижче і до центру транспортного засобу з метою підвищення стійкості. Підйомну систему додано до базової конструкції транспортного засобу (рис. 2.5).

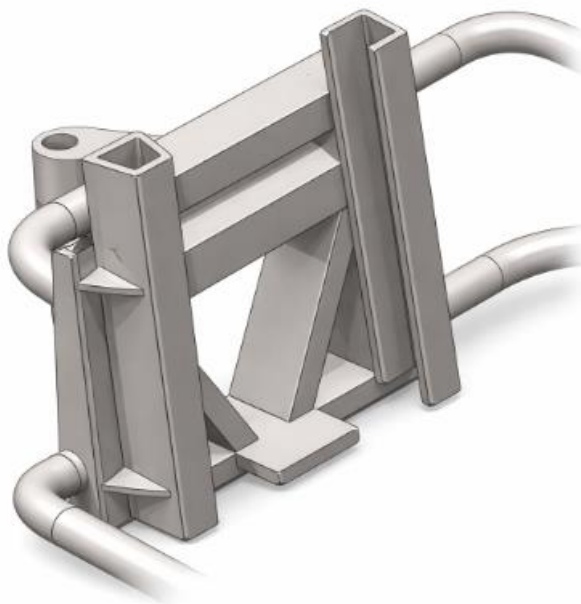


Рис. 2.5 — Конструкція підйомної системи

Деталі з'єднано зварюванням із додатковими ребрами жорсткості (рис. 2.6).

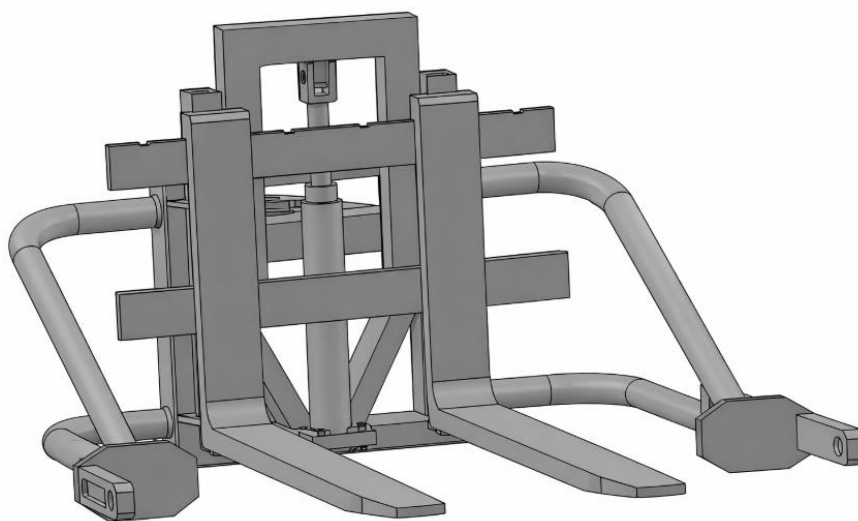


Рис. 2.6 – Система підйому з гідроциліндром розроблені у SolidWorks

Привід транспортного засобу. У дипломній роботі передбачено використання електричного приводу для транспортного засобу. Після ретельного дослідження різних видів електричних приводів вирішено застосувати електродвигуни у маточині колеса. Цей вид електродвигунів наразі надзвичайно популярний, особливо в електровелосипедах та

електросамокатах, а також активно розвивається для важчих транспортних засобів: різноманітних роботів, будівельних машин і навіть автомобілів. У концепції транспортного засобу використано високотехнологічний електродвигун у маточині колеса, розроблений словенською компанією GEM motors. Двигуни цього типу займають мало місця, мають достатню потужність і прості в монтажі (рис. 2.7).

З огляду на велику масу та навантаження, які транспортуватимуться, вирішено застосувати привід на всіх трьох колесах транспортного засобу. Це дозволить підвищити стабільність і потужність транспортного засобу навіть на розмоклому та непридатному для їзди рельєфі (рис. 2.8). Двигун оснащено інтегрованим електромагнітним гальмом і можливістю рекуперативного гальмування, що забезпечує ефективне гальмування з одночасним повільним зарядженням акумулятора. На електродвигун встановлено пневматичну шину для невідготовленої місцевості з метою підвищення зчеплення на м'яких поверхнях. Вузол електродвигуна у маточині колеса і пневматичної шини важить 28 кг.



Рис. 2.7–2.8 — Вузол колеса з електродвигуном

Вузол заднього колеса. При проектуванні транспортного засобу розглядалося два різних варіанти виконання вузла заднього колеса. Перший варіант – з двома колесами, що дозволило б суттєво підвищити стабільність і вантажопідйомність, але збільшило б масу та габарити і ускладнило б рульове управління. Другий варіант – з одним колесом, що забезпечує просте рульове управління навіть у вузьких ділянках майданчика (рис. 2.9).



Рис. 2.9. Колесо рульового управління.

Конструкція все ще є достатньо міцною та стабільною для безпечної роботи транспортного засобу.

Рукоятка для керування транспортним засобом. До вузла заднього колеса прикріплено кронштейни для рукоятки. Рукоятка використовується для управління та керування всім транспортним засобом (рис. 2.10).

На рукоятці є два органи управління, що обертанням регулюють потужність двигуна і тим самим швидкість руху транспортного засобу: обертання вперед означає рух вперед, і навпаки (рис. 2.11).



Рис 2.10. Рукоятка управління транспортним засобом.



Рис. 2.11. Органи управління візком.

Також передбачено два кнопки для підйому і опускання гідравлічного циліндра. На верхній частині рукоятки розміщена велика червона кнопка, звернена до оператора – це кнопка аварійного вимкнення, яка миттєво відключає двигуни і вмикає всі електромагнітні гальма.

2.3 Розрахунок необхідної потужності електродвигуна у маточині колеса. Розрахунок сили тяжіння на підйомі

Для розрахунку необхідної потужності електродвигунів визначено силу тяжіння транспортного засобу з повним навантаженням на підйомі кутом 10° . Відповідно до формули:

$$F_g = m \cdot g \cdot \sin(\alpha) = 2150 \text{ кг} \cdot 9,81 \text{ м/с}^2 \cdot \sin(10^\circ) = 3662,5 \text{ Н}$$

де $m = 2150$ кг – маса транспортного засобу з повним навантаженням; $\alpha = 10^\circ$ – кут підйому; $g = 9,81$ м/с² – прискорення вільного падіння.

Розрахунок необхідної потужності для подолання підйому

$$P_\alpha = Fg \cdot v = 3662,5 \text{ Н} \cdot 1,3 \text{ м/с} = 4761,25 \text{ Вт} \approx 4,761 \text{ кВт}$$

де $v = 1,3$ м/с – максимальна швидкість транспортного засобу.

Розрахунок потужності для подолання опору кочення

$$P_C = c \cdot m \cdot g \cdot v = 0,06 \cdot 2150 \cdot 9,81 \cdot 1,3 = 1645,1 \text{ Вт} \approx 1,645 \text{ кВт}$$

де $c \approx 0,06$ – коефіцієнт опору кочення (приблизний опір пневматичної шини на піску).

Розрахунок потужності для розгону

Кінетична енергія транспортного засобу при досягненні максимальної швидкості:

$$W_k = (m \cdot v^2) / 2 = (2150 \cdot 1,3^2) / 2 = 1818 \text{ Дж}$$

Необхідна потужність для розгону (за умови часу розгону $t = 2$ с):

$$P_a = W_k / t = 1818 / 2 = 909 \text{ Вт} \approx 0,909 \text{ кВт}$$

Сумарна необхідна потужність

$$P = P_a + P_\alpha + P_C = 0,909 + 4,761 + 1,645 = 7,315 \text{ кВт}$$

Фактична необхідна потужність

З урахуванням коефіцієнта корисної дії $\eta = 0,90$ (для електродвигуна у маточині колеса):

$$P_{\text{дійсн}} = P / \eta = 7,315 / 0,90 \approx 8,128 \text{ кВт}$$

Таким чином, мінімальна сумарна потужність усіх електродвигунів транспортного засобу з повним навантаженням на підйомі 10° при максимальній швидкості $1,3$ м/с повинна становити не менше $8,2$ кВт.

2.4 Вибір електродвигунів та акумуляторного блоку. Вибір електродвигунів у маточині колеса

Виходячи з розрахунку необхідної потужності для руху транспортного засобу по пересіченій місцевості з підйомом 10° при

повному навантаженні, встановлено мінімальну необхідну потужність – 8 кВт. Оскільки транспортний засіб оснащено трьома електродвигунами у маточинах коліс, вирішено встановити у заднє колесо потужніший двигун, здатний самотійно приводити транспортний засіб у рух по рівній поверхні та менш вимогливому рельєфу. Цей двигун функціонує постійно. У два передніх колеса встановлено менш потужні двигуни, які вмикаються при русі на підйом, подоланні перешкод або в умовах несприятливого рельєфу.

У заднє колесо встановлено двигун G2.6 компанії GEM motors із регульованою потужністю 5 кВт. У два передніх колеса встановлено двигуни G2.4 із регульованою потужністю по 3 кВт кожний (рис. 2.12).



Рис. 2.12 – Електродвигун у маточині колеса GEM motors.

Загальна потужність системи транспортного засобу становить 11 кВт, що достатньо для непередбачуваних ситуацій, які можуть виникати на території ремонтних майстерень.

Вибір акумуляторного блоку. Акумуляторний блок підібрано відповідно до потреб транспортного засобу. Оскільки він призначений для транспортування піддонів на території ремонтних майстерень, де стандартний робочий день зазвичай становить вісім годин, а передбачуваний час роботи – переміщення піддонів – одну годину на день, очікується постійна робота заднього електродвигуна та епізодичне

підключення двох передніх. Таким чином, передбачувана добова витрата енергії для безперебійної роботи системи складає 6,5 кВт·год.

Виходячи з даних виробника про роботу електродвигунів при напрузі 48 В, необхідну ємність акумуляторного блоку визначено за формулою:

$$C = P_p / U = 6500 / 48 = 135,42 \text{ А} \cdot \text{год}$$

де $P_p = 6500$ Вт – передбачувана добова витрата енергії; $U = 48$ В – робоча напруга електродвигунів.

Для кращого розподілу ваги блок розділено на дві частини і розміщено по обидва боки транспортного засобу (рис. 2.13). Це підвищить стабільність транспортного засобу та збереже центр мас у центральному положенні.



Рис. 2.13. Розміщення акумуляторів.

Обрано літій-іонні акумулятори компанії Lithium Storage Limited, оскільки вони легші і мають більшу питому енергоємність порівняно з іншими типами акумуляторів. Для транспортного засобу підібрано

виготовлений на замовлення акумуляторний блок, що складається з двох акумуляторів ємністю 100 А·год і напругою 48 В кожний (рис. 2.14).



Рис. 2.14 Акумуляторна батарея.

Два таких акумуляторних блоки забезпечують достатній час роботи транспортного засобу. Вони швидко заряджаються і мають тривалий термін служби – понад три тисячі циклів заряд-розряд. Акумуляторні блоки захищені ступенем захисту IP54 і додатково захищені в корпусі транспортного засобу.

2.5 Міцнісна симуляція

Після складання повної моделі транспортного засобу виконано симуляцію у програмному пакеті SolidWorks. Найбільш критичним елементом конструкції визначено несучий вузол виделок, приварений до базової конструкції (рис. 2.15).

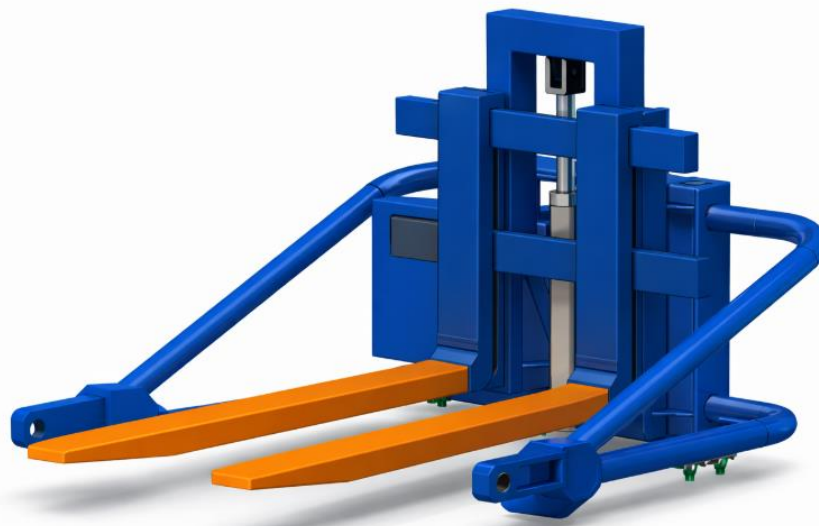


Рис. 2.15 Модель задано навантаження величиною 20 000 Н

На модель задано навантаження величиною 20 000 Н. Навантаження перевищує проектну вантажопідйомність з урахуванням коефіцієнта безпеки 1,5. Проектна вантажопідйомність виделок становить 1300 кг, тоді як симуляцію виконано при навантаженні приблизно 2000 кг. Визначено контактні поверхні між деталями транспортного засобу: між виделками і рухомою частиною, закріпленою на циліндрі й обмеженою напрямними (рис. 2.16), а також між рухомою частиною і напрямними, приварені до базової конструкції (рис. 2.17).

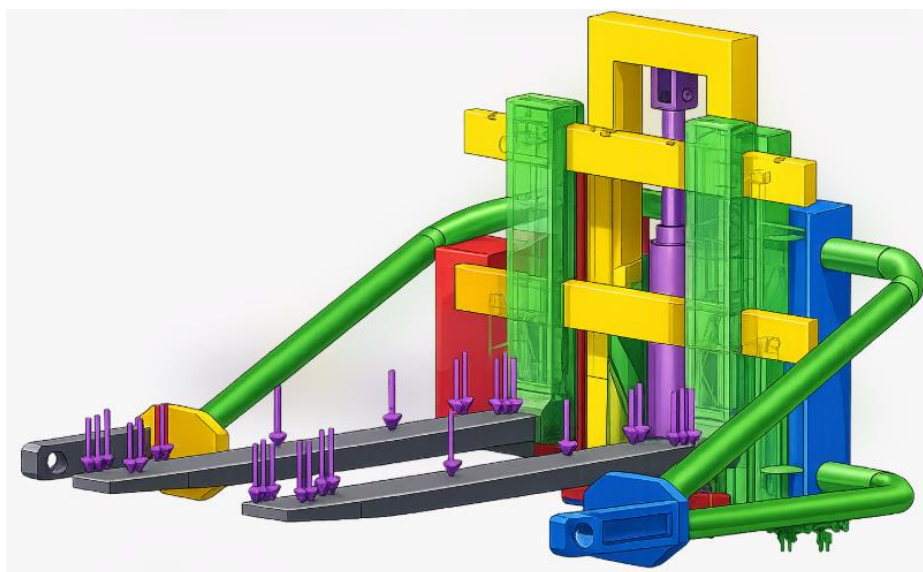


Рис. 2.16 Контактні поверхні між деталями транспортного засобу: між виделками і рухомою частиною.

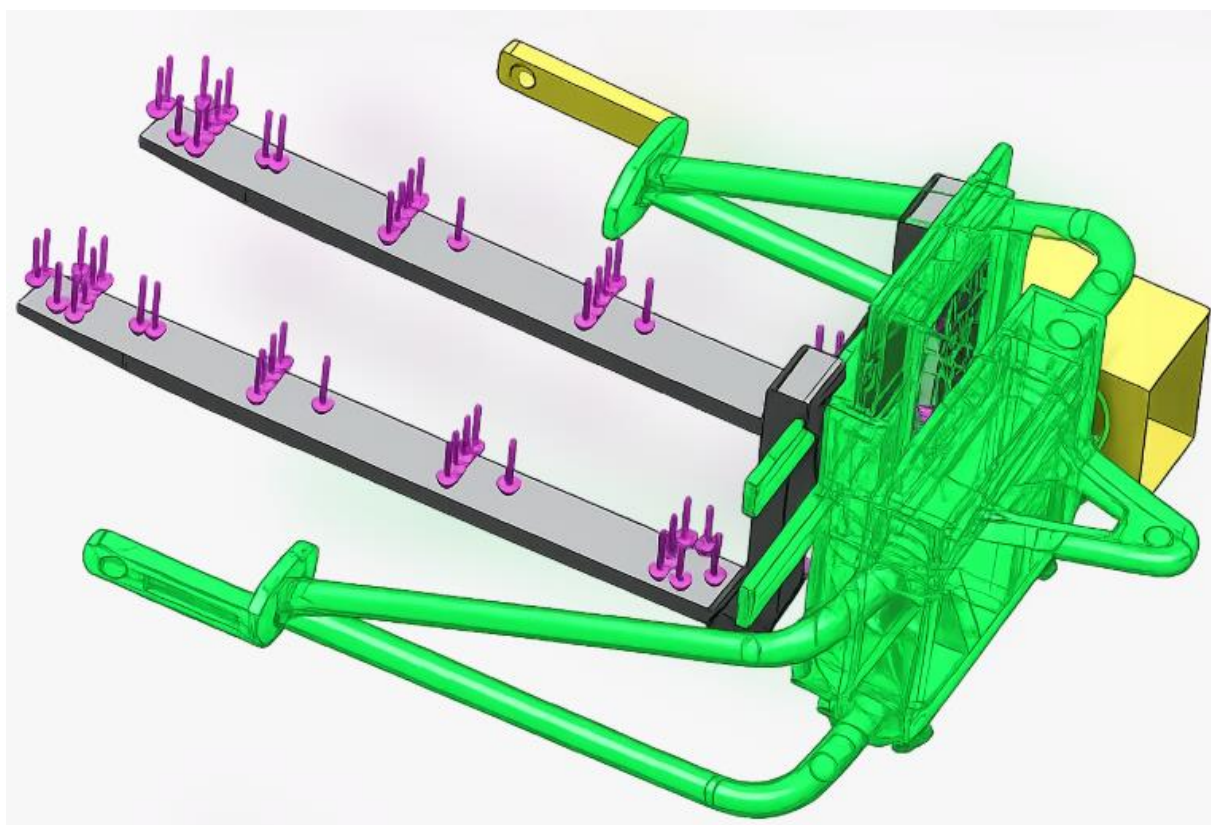


Рис. 2.17. Контактні поверхні між деталями транспортного засобу: між рухомою частиною і напрямними, приварені до базової конструкції.

Конструкції присвоєно матеріал S335JR із такими характеристиками (табл. 2.2):

Таблиця 2.2 – Властивості матеріалу S335JR

Параметр	Значення
Модуль пружності E , МПа	210 000
Коефіцієнт Пуассона ν	0,3
Щільність ρ , кг/м ³	7800
Границя плинності $R_{p0,2}$, МПа	335
Міцність на розтяг R_m , МПа	510

Після визначення всіх параметрів сформовано сітку скінченних елементів (рис. 2.18). Сітку побудовано з більшим розміром елементів, оскільки симуляція не є особливо складною і не вимагає надвисокої точності (табл. 2.3):

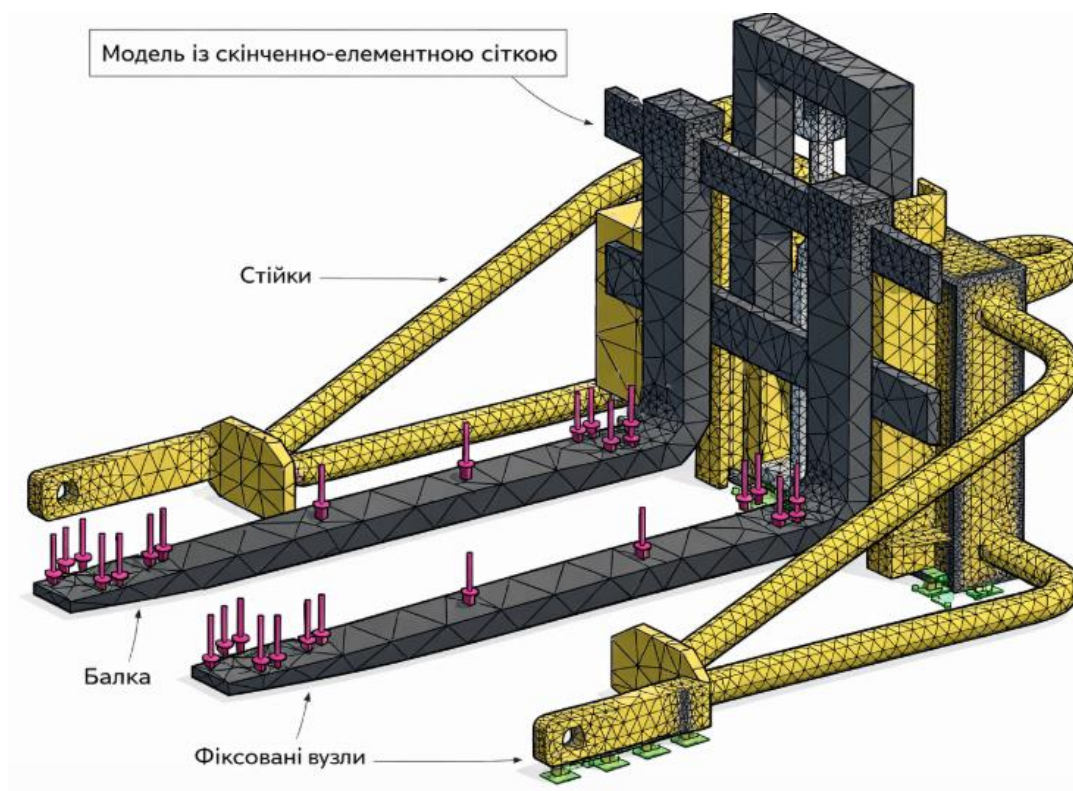


Рис. 2.18 Сітка скінченних елементів.

Таблиця 2.3 – Параметри сітки скінченних елементів

Макс. розмір СЕ, мм	Мін. розмір СЕ, мм	Кількість СЕ	Кількість вузлів
120	6	69 301	132 204

Після побудови сітки запуснено симуляцію і отримано результати. Перевірено ділянки з максимальними напруженнями та деформаціями, спричиненими навантаженням. Найбільша деформація зафіксована на кінці виделок і становить 23,9 мм (рис. 2.19). Деформація виделок під великими навантаженнями є очікуваною і знаходиться у допустимих межах. У конструкції деформації є мінімальними та незначними, що підтверджує несучу здатність конструкції.

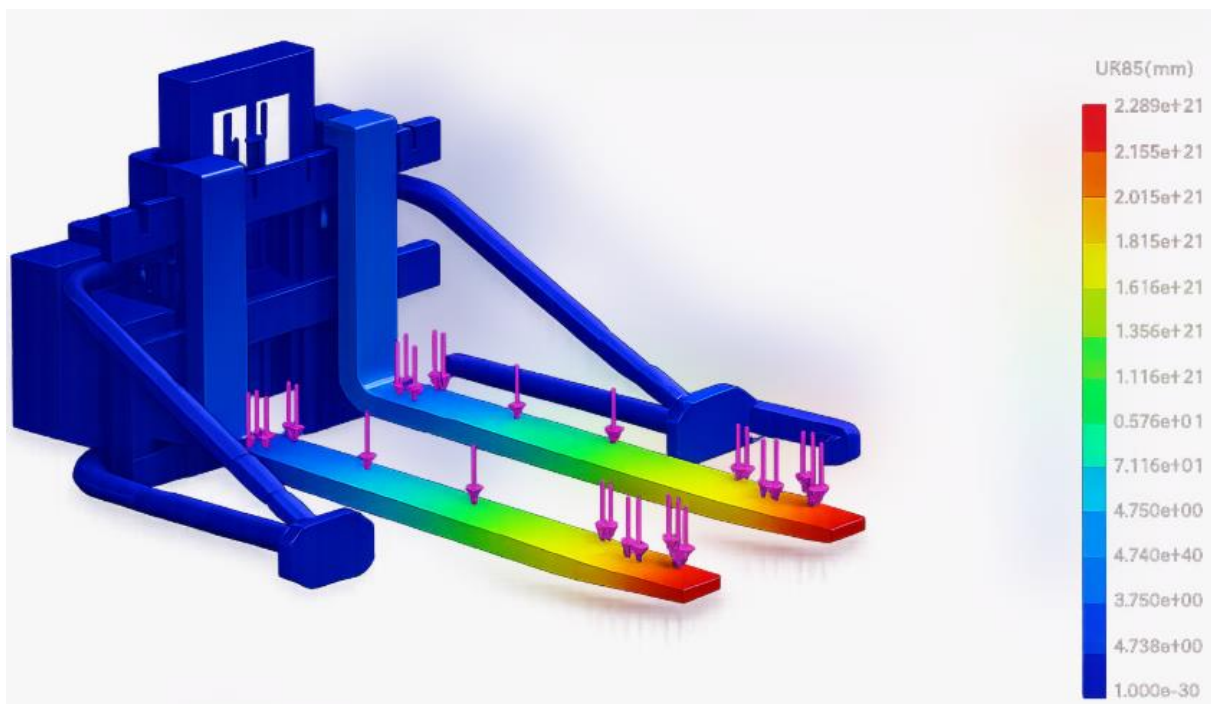


Рис. 3.23 – Модель та результати симуляцій, розроблені у SolidWorks

Також за допомогою симуляції перевірено рівень напружень у конструкції (рис. 2.20). Напруження з'являються у виделках і напрямних і сягають величини до 306 Н/мм^2 . З огляду на обраний матеріал конструкції S335JR із міцністю на розтяг 510 Н/мм^2 і границею плинності 355 Н/мм^2 , підтверджено, що конструкція витримає передбачуване навантаження.

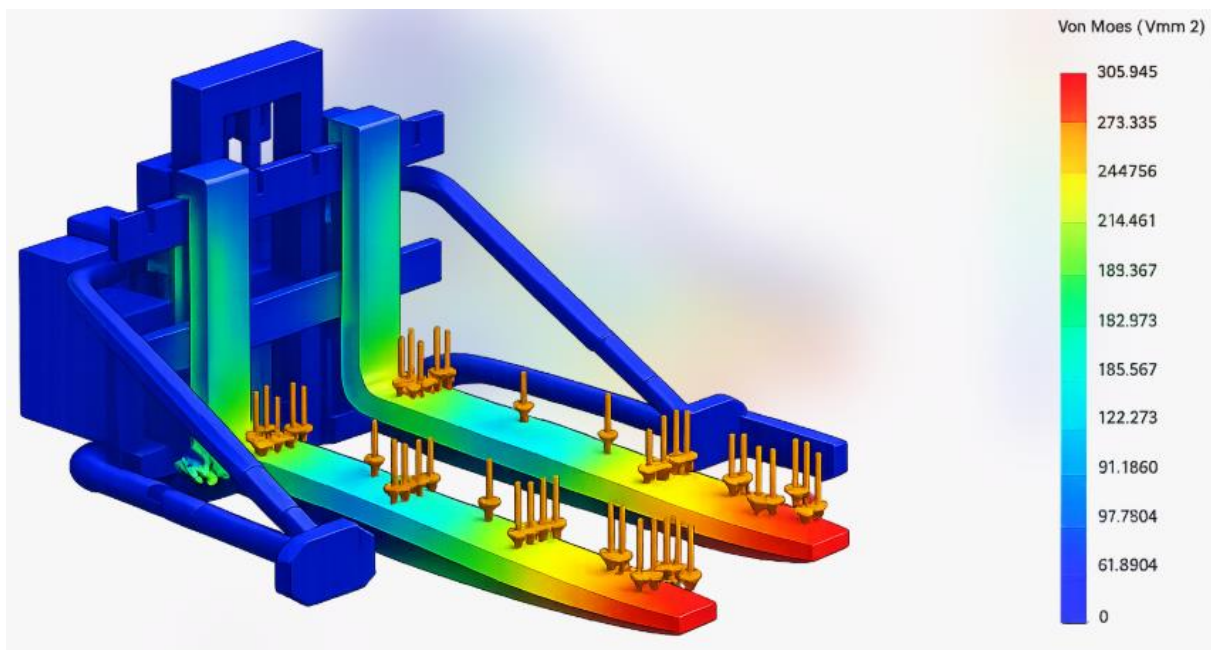


Рис. 2.20 – Модель та результати симуляцій, розроблені у SolidWorks

3. ОХОРОНА ПРАЦІ

3.1 Загальні вимоги безпеки

Розроблений транспортний засіб призначений для експлуатації безпосередньо поблизу людей на території ремонтних майстерень, що обумовлює підвищені вимоги до безпеки. При проектуванні конструкції враховано актуальні норми та правила охорони праці для подібного класу машин.

До основних заходів безпеки, реалізованих у конструкції, відносяться: кнопка аварійного зупинення, що миттєво відключає всі двигуни та вмикає електромагнітні гальма; система рекуперативного гальмування, що дозволяє плавно сповільнювати транспортний засіб; обмежена максимальна швидкість руху (1,3 м/с), що зменшує ризик травматизму; низьке розташування центру мас, що підвищує поздовжню та поперечну стійкість.

3.2 Вимоги до оператора та інструктаж

Оператор транспортного засобу повинен пройти відповідний інструктаж з безпечної експлуатації засобу перед початком роботи. До роботи з транспортним засобом допускаються особи не молодше 18 років, що пройшли медичний огляд і не мають протипоказань за станом здоров'я. Під час роботи оператор зобов'язаний: використовувати засоби індивідуального захисту (захисні черевики, захисний шолом, сигнальний жилет); дотримуватись обмежень вантажопідйомності (не більше 1300 кг); не перевозити людей на транспортному засобі або на піддоні; утримувати безпечну відстань між транспортним засобом і іншими людьми; виконувати перевірку технічного стану засобу перед початком зміни.

3.3 Безпека електричної системи

Оскільки транспортний засіб оснащено електричним приводом, особливу увагу приділено безпеці електричної системи. Акумуляторні блоки захищені ступенем захисту IP54, що забезпечує захист від пилу та

водяних бризок. Усі електричні з'єднання виконані з застосуванням вологозахисних роз'ємів. Система управління двигунами має вбудований захист від перевантаження, перегріву та короткого замикання. При технічному обслуговуванні забороняється розкривати акумуляторні блоки без кваліфікованого персоналу.

3.4 Вимоги до умов роботи та технічного обслуговування

Транспортний засіб допускається до роботи на рельєфі з кутом схилу до 10°. Забороняється використання транспортного засобу на крижаній поверхні або в умовах ожеледиці. При транспортуванні засобу на причепі необхідно надійно закріпити його від переміщення. Технічне обслуговування (перевірка стану шин, гідравлічної системи, електричних з'єднань) повинно виконуватись регулярно згідно з регламентом, встановленим виробником компонентів. Гідравлічна система працює з рідиною під тиском, тому роботи з нею дозволяються лише після повного зниження тиску у системі.

4. ОБҐРУНТУВАННЯ ДОСЯГНУТИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

4.1 Функціонування та управління транспортним засобом

Розроблений транспортний засіб має привід на всіх трьох колесах. Заднє колесо може повертатися до прямокутного положення відносно конструкції, що дозволяє здійснювати гострі повороти, фактично на місці (рис. 4.1).



Рис. 4.1. Розроблений транспортний засіб.

При дуже гострому повороті передні колеса обертаються у протилежних напрямках – одне вперед, інше назад – оскільки транспортний засіб майже повністю розвертається на місці. При менш гострих поворотах, де заднє колесо не перпендикулярне конструкції, колеса функціонують аналогічно автомобільним, за тим винятком, що у цьому транспортному засобі диференціал відсутній – замість нього керування здійснюється програмуванням управління двигунами. При повороті зовнішнє переднє колесо повинне обертатися швидше, ніж внутрішнє. При невеликих навантаженнях, коли працює лише задній електродвигун, передні колеса обертаються вільно. При більших навантаженнях та потребі в більшій потужності вмикаються також передні двигуни (рис. 4.2).



Рис. 4.2. Зображення електродвигунів

4.2 Відповідність технічному завданню

У результаті виконання роботи успішно розроблено концепцію транспортного засобу для перевезення піддонів по пересіченій місцевості. Аналіз відповідності розробленої концепції вимогам технічного завдання (табл. 4.1) дозволяє зробити такі висновки:

Таблиця 4.1. Аналіз відповідності розробленої концепції вимогам технічного завдання.

Вимога	Тип вимоги
Максимальна маса транспортного засобу 750 кг	М
Вантажопідйомність не менше 1300 кг	М
Електричний привід	Ж
Транспортування з посвідченням категорії В	Б
Естетичний вигляд	Ж
Доступна вартість	Ж
Запобігання пошкодженню ґрунту	Б

- Передбачена вантажопідйомність 1300 кг досягнута та підтверджена міцнісною симуляцією з навантаженням 20 000 Н (коефіцієнт безпеки 1,5).

- Максимальне напруження в конструкції (306 Н/мм^2) не перевищує границі плинності матеріалу S335JR (335 Н/мм^2), що підтверджує міцність конструкції.

- Загальна маса транспортного засобу знаходиться у межах, що дозволяють його перевезення причепом вантажопідйомністю 750 кг.

- Застосовано електричний привід на базі електродвигунів у маточинах коліс GEM motors.

- Конструкція триколісного транспортного засобу забезпечує можливість маневрування у вузьких просторах та мінімізує руйнування рельєфу.

- Підібрано акумуляторний блок ємністю $2 \times 100 \text{ А} \cdot \text{год} / 48 \text{ В}$, що забезпечує добову автономність роботи відповідно до розрахованих потреб у енергії.

Порівняння з аналогами

Порівняно з існуючими ринковими аналогами (розділ 1.2) розроблений транспортний засіб має такі переваги: значно менша маса конструкції порівняно з електричним палетним навантажувачем Vestil (511 кг), що дозволяє транспортувати засіб причепом категорії В; здатність долати підйоми до 10° з повним навантаженням, тоді як аналоги обмежені 3° ; триколісна схема забезпечує краще маневрування у вузьких просторах; повний привід на три колеса підвищує прохідність на пересіченій місцевості; наявність рекуперативного гальмування продовжує пробіг на одному заряді.

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі успішно представлено концепцію транспортного засобу для перевезення піддонів по пересіченій місцевості. Проектування і конструювання поділено на кілька етапів.

Розпочато зі збору ідей, формулювання цілей та вимог. Передбачено, що транспортний засіб може транспортувати масу 1300 кг, що підтверджено розрахунками та симуляцією. Також поставлено та досягнуто мету щодо можливості перевезення транспортного засобу причепом вантажопідйомністю до 750 кг.

У програмному пакеті SolidWorks створено модель транспортного засобу. Розпочато з конструювання базової конструкції та додано підйомний механізм. Підібрано гідравлічну систему, придатну для транспортного засобу, і включено до моделі.

Для приводу обрано електродвигуни у маточинах коліс, що стало значним викликом у зв'язку з новизною цієї системи. Після дослідження ринку та розгляду всіх можливостей і видів електродвигунів вирішено включити у транспортний засіб електродвигуни у маточині колеса словенської компанії GEM motors. Двигуни змодельовано у програмному пакеті SolidWorks і встановлено на транспортний засіб відповідно до інструкцій виробника.

Для правильного вибору типу і потужності двигуна виконано розрахунок необхідної потужності для транспортного засобу. Передбачено, що транспортний засіб повністю навантажений і перевозить піддон по підйому 10° . Загальна встановлена потужність системи (11 кВт) перевищує розраховану мінімальну потужність (8,2 кВт), що забезпечує достатній запас потужності для непередбачуваних ситуацій на території ремонтних майстерень.

Наприкінці за допомогою симуляції перевірено міцність транспортного засобу і проаналізовано результати напружень та

деформацій, що виникають у конструкції. Максимальне напруження у конструкції становить 306 Н/мм^2 , що є нижчим за границю плинності матеріалу (335 Н/мм^2), а максимальна деформація кінців виделок складає $23,9 \text{ мм}$ при навантаженні з коефіцієнтом безпеки $1,5$. Отримані результати підтверджують прийнятну міцність та несучу здатність розробленої конструкції транспортного засобу.

Розроблена концепція відповідає всім обов'язковим вимогам технічного завдання та являє собою реалістичне інженерне рішення проблеми транспортування піддонів на території ремонтних майстерень із неупорядкованим рельєфом. Подальшим перспективним напрямом досліджень є виготовлення фізичного прототипу для практичної перевірки характеристик транспортного засобу, а також розробка системи автоматичного керування двигунами з урахуванням диференційного ефекту при поворотах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- 1.Баженов В. А. Основи теорії машин і механізмів. – Київ: Вища школа, 2018. – 320 с.
- 2.Бондаренко В. М. Механіка матеріалів і конструкцій. – Харків: НТУ «ХП», 2019. – 412 с.
- 3.Гуржій А. М. Електричні машини та приводи. – Київ: Либідь, 2017. – 356 с.
- 4.ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. – Київ, 2016.
- 5.ДСТУ ISO 12100:2014. Безпечність машин. Загальні принципи проектування. – Київ, 2015.
- 6.Ковальчук В. І. Гідравліка і гідропроводи. – Львів: Новий Світ, 2020. – 368 с.
- 7.Кузьмін О. Є. Основи інженерного проектування. – Київ: Кондор, 2019. – 400 с.
- 8.Ловейкін В. С. Розрахунок та конструювання машин. – Київ: КП, 2018. – 290 с.
- 9.Мельник Л. П. Теоретична механіка. – Київ: Вища школа, 2017. – 384 с.
10. Петренко О. М. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів. – Харків, 2021. – 410 с.
11. Савченко О. Я. Електротехніка та електроніка. – Київ: Каравела, 2019. – 300 с.
12. Сидоренко І. В. Основи машинобудування. – Дніпро: НГУ, 2020. – 350 с.
13. Budynas R. G., Nisbett J. K. Shigley's Mechanical Engineering Design. – New York: McGraw-Hill, 2020. – 1100 p.
14. Dassault Systèmes. SolidWorks User Guide. – 2023. – 1200 p.

15. Elaphe Propulsion Technologies. In-Wheel Motor Technology Overview. – 2022.
16. GEM Motors. In-Wheel Electric Motors Technical Documentation. – 2023.
17. Hamrock B. J. Fundamentals of Fluid Film Lubrication. – CRC Press, 2017. – 700 p.
18. Heisler H. Advanced Vehicle Technology. – Butterworth-Heinemann, 2018. – 800 p.
19. ISO 4413:2010. Hydraulic fluid power – General rules. – ISO, 2010.
20. ISO 12100:2010. Safety of machinery – General principles. – ISO, 2010.
21. Lithium Storage Ltd. Battery Systems Technical Manual. – 2023.
22. Norton R. L. Machine Design: An Integrated Approach. – Pearson, 2020. – 900 p.
23. SKF Group. Rolling Bearings Catalogue (51108). – 2022.
24. Vestil Manufacturing Corp. Electric Pallet Truck Specifications. – 2023.
25. Wittenbauer F. Machine Elements: Design and Calculation. – Springer, 2019. – 650 p.

ДОДАТОК

