

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 шківних систем для витягування
сталевого каната з лісової лебідки.»**

Виконав: студент 3 курсу, групи 31к -ім
освітньої програми бакалавр
спеціальності 208 «Агроінженерія»
Слободян Артур Романович
(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)
Слободян Артуру Романовичу
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту **«Удосконалення шківних систем для витягування сталевих канатів з лісової лебідки..»**

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

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ЗА ТЕМОЮ.....	7
1.1. Система із зовнішнім привідним шківом та гідродвигуном.....	7
1.2. Система двобарабанної лебідки.....	8
1.3. Модульний спосіб витягування сталевго каната.....	9
1.4. Вимоги підприємства-замовника.....	10
2. ТЕОРЕТИЧНІ ТА ПРОЕКТНІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	12
2.1. Ідейне проектування: принципи роботи та геометрія виробу.....	12
2.2. Розробка шківа та конструювання першого прототипу.....	13
2.3. Числові симуляції та аналіз навантажень.....	16
2.4. Проектування шківа з електродвигуном.....	18
2.5. Розрахунок параметрів електродвигуна.....	19
2.6. Геометричне моделювання другого прототипу.....	21
3. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	25
3.1. Загальні вимоги безпеки при роботі з лісовими лебідками.....	25
3.2. Захист від контакту з рухомими частинами.....	26
3.3. Заходи запобігання мимовільному руху сталевго каната.....	26
3.4. Вимоги до монтажу та технічного обслуговування.....	26
3.5. Електробезпека (для другого прототипу).....	27
4. ОБҐРУНТУВАННЯ ДОСЯГНУТИХ РЕЗУЛЬТАТІВ.....	28
4.1. Порівняння систем та технічні результати.....	28
4.2. Економічна оцінка.....	29
ВИСНОВКИ.....	31
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	33

ВСТУП

Витягування сталевих канатів з лісової лебідки є фізично надзвичайно трудомістким процесом. Подолання опору барабана, на який намотано сталевий канат, а також опору приводу та головного шківів унеможлиблює ефективне ручне розмотування каната без допоміжних механізмів. Саме тому на лебідку встановлюється додатковий привідний шків, що полегшує розмотування каната і знижує фізичне навантаження на оператора [6, 7].

Підприємство «Pišek-Vitli Krapan» вже розробило привідний шків, однак у ході його експлуатації виявлено низку суттєвих недоліків, що негативно впливають як на продуктивність, так і на безпеку роботи з лебідкою. Зокрема, наявний шків спричиняє перегини сталевих канатів, що значно скорочує строк його служби. Великі зовнішні габарити шківів обмежують робочу зону підйомної платформи: у крайніх положеннях шківів торкається рами, що може пошкодити конструктивні елементи або защемити гідравлічний шланг. Складна конструкція з великою кількістю деталей ускладнює серійне виробництво, а загромадженість верхньої частини лебідки погіршує візуальну цілісність та стабільність конструкції. [16, 17, 21]

Таким чином, вдосконалення конструкції привідного шківів для лісових лебідок є актуальним завданням як із технічної, так і з економічної точки зору [1, 2].

Мета та завдання роботи:

Метою дипломної роботи є дослідження, розробка, конструювання та оцінка привідного шківів для професійних лісових лебідок із метою усунення виявлених недоліків існуючих рішень.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз ринкових рішень конкурентів та виявити конструктивні підходи, придатні для впровадження;

- розробити два прототипи, варіанти привідних шківів, що максимально відповідають встановленим вимогам щодо безпеки, компактності та ергономіки;
- виконати числові симуляції міцності з використанням методу скінченних елементів (МСЕ) у середовищі SolidWorks Simulation;
- розрахувати параметри електродвигуна як альтернативного приводу шківа;
- провести економічний аналіз розроблених систем і порівняти їх із наявним рішенням;
- підготувати всі компоненти та вузли в 3D-моделі для подальшого виготовлення прототипів.

Шків, розроблений у межах дипломної роботи, буде компактнішим, естетично досконалішим і простішим в складанні та експлуатації порівняно з існуючими рішеннями.

1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ЗА ТЕМОЮ

Для аналізу існуючих рішень застосовано метод зворотної інженерії, що передбачає аналіз та розуміння принципів роботи пристроїв на основі загальнодоступних зображень, відеозаписів та технічної документації. Оскільки безпосередній доступ до готових систем конкурентів відсутній, аналіз базується на даних із відкритих джерел [4].

1.1. Система із зовнішнім привідним шківом та гідродвигуном

Перше досліджене підприємство – Igland – спеціалізується виключно на причіпних лісових лебідках. На їхній двобарабанній лебідці було виявлено, що важкі барабани з канатом розташовані у верхній частині конструкції (рисунок 1.1), що призводить до підвищення центру мас. Це є небажаним для роботи на крутих лісових схилах. На передній стінці лебідки встановлено витягувальний шків, що приводиться гідродвигуном – подібне технічне рішення становить значний інтерес для даної роботи.

Шків на передній стінці лебідки має бути нескінченно обертовим, щоб забезпечити витягування деревини в усіх напрямках. Якщо на нього встановити гідравлічний привід, необхідно забезпечити підведення та відведення оливи, що не може бути вирішено простим гнучким шлангом. Потрібно розробити обертовий гідравлічний механізм із двома каналами для подачі та зливу оливи, крізь вісь обертання якого проходить сталевий канат. Такий вузол містить велику кількість деталей, вимагає точної обробки та складання, що підвищує ризик відмов (витоків оливи, порушень роботи) [3, 23, 24, 27].



Рисунок 1.1 – Шків підприємства Iglan.

1.2. Система двобарабанної лебідки

Підприємство Pfanzelt Maschinenbau також розробляє надбудови для тракторних лебідок. На одній з їхніх моделей двобарабанних тракторних лебідок видно, що витягування каната вирішено аналогічно першому підприємству – за допомогою зовнішнього гідравлічно привідного шків (рисунок 1.2). Можна спостерігати один зовнішній привідний шків та один простий відхилювальний шків, що характерно для двобарабанної лебідки. Барабани з канатом переміщено якомога нижче для поліпшення центру мас трактора, тоді як вихід каната розташовано у верхній частині лебідки [23, 24].

Коли барабани розташовані в нижній частині лебідки, канат перегинається через два шків – перший на передній стінці, другий перенаправляє канат на барабан і забезпечує рівномірне намотування. Перегинів каната через шків намагаються уникати, оскільки кожне перенаправлювальне колесо скорочує строк служби каната. Цю проблему можна вирішити підняттям барабанів, проте тоді виникає компроміс із підвищенням центру мас трактора [23].

Шляхом підйому барабанів звільняється простір у нижній частині лебідки, що дозволяє перемістити підйомну платформу ближче до задніх коліс трактора. Тим самим збільшується підйомна сила на платформі за рахунок меншого плеча та зменшується ризик відриву передніх коліс трактора при навантаженні. На передній стінці видно два простих перенаправлювальних шківів, з чого можна зробити висновок, що система витягування каната вбудована між намотувальним барабаном і зовнішнім шківом. Таке рішення є доцільним, оскільки не потребує складного зовнішнього привідного шківа, а канат іде безпосередньо до барабана, не перегинаючись через привідне колесо. Компоненти приховані у корпусі, що естетично оформлений і одночасно захищає елементи від пошкоджень [23, 24].

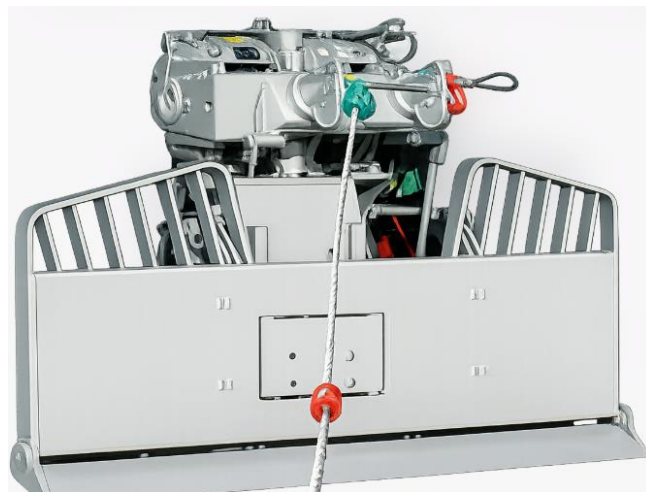


Рисунок 1.2 – Двобарабанна лебідка.

1.3. Модульний спосіб витягування сталевого каната

Тракторні надбудови виявлено також у підприємства Uniforest. Встановлено, що вони також розмістили барабани у вищій точці, а зовнішні шківви закріпили на підйомній платформі. Для витягування каната з барабана розроблено спеціальний модуль, встановлений на верхній частині підйомної платформи. При підйомі та опусканні платформи модуль нахиляється так, щоб канат спрямовувався приблизно по дотичній до барабана, зменшуючи перегини через ролики (Рис 1.3).

Для точнішого спрямування на задній стінці встановлено два ролики, що направляють канат під час намотування. Діаметр роликів становить приблизно 40-50 мм, що є менше мінімально допустимого значення, яке регламентує виробник каната (мінімальний діаметр колеса – щонайменше 10-кратний діаметр каната). Таких конструктивних рішень необхідно уникати. Проте модульна система є привабливою, оскільки забезпечує просте сервісне обслуговування та не вимагає складних деталей для виготовлення чи монтажу [6, 25].

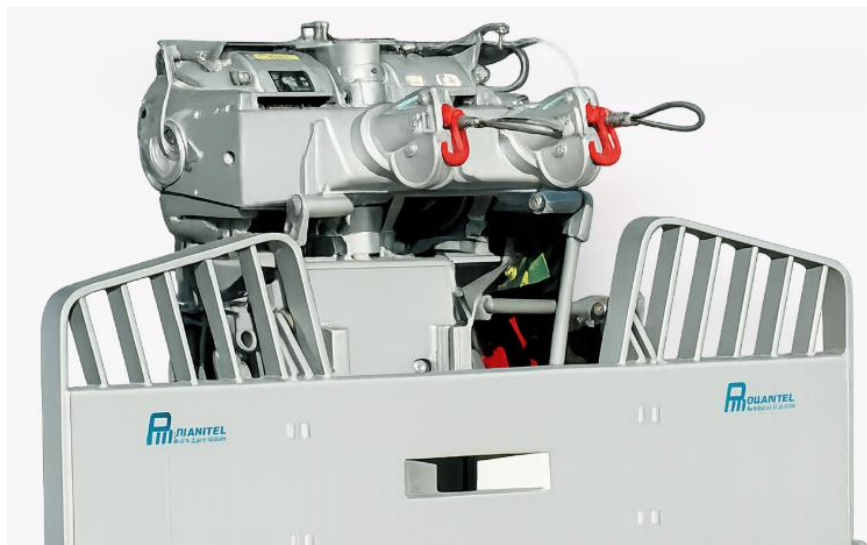


Рисунок 1.3 – Модульна система (джерело: [25])

1.4. Вимоги підприємства-замовника

При підготовці конструктивних рішень використано не лише досвід інших виробників, а й результати переговорів із підприємством-замовником, яке сформулювало такі технічні вимоги:

- Зусилля у канаті: 85 кН (приблизно 8,5 тонни).
- Діаметр огинання каната: не менше 10-кратного діаметру каната.

Передбачений сталевий канат діаметром 13 мм.

– Привід: потужність і крутний момент витягування забезпечуються гідродвигуном BGM об'ємом 32 см³/об.

– Швидкість витягування: не більше 6 м/с (на основі цього визначається необхідна витрата оливи).

– Гальмівне зусилля: вбудоване механічне попереднє гальмо при намотуванні каната на барабан, близько 1000 Н (100 кг).

– Передбачені варіанти виконання: варіант 1 — шків із попереднім гальмом і відхиленням; варіант 2 — шків із попереднім гальмом і гідродвигуном для витягування.

– Вимикач: вбудований кінцевий вимикач для зупинки натягування. Виконання має забезпечити компенсацію довжини каната при підйомі чи опусканні підйомної платформи.

– Конструктивні вимоги: шків має бути нескінченно обертовим; забезпечувати достатній кут відхилення по горизонталі (близько 15°) та вертикалі (близько 45°); монтаж сталевого каната виконується менш ніж за 60 с без спеціального інструменту; жорсткість кронштейна — переміщення менше 0,1 мм при максимальному навантаженні 10 кН; кріплення не більше чотирма болтами стандартних розмірів.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ТА ПРОЕКТНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Ідейне проектування: принципи роботи та геометрія виробу

Аналіз існуючих рішень дозволив виявити низку підходів, що можуть бути корисними для вдосконалення конструкції. Підприємство вже розробило власну систему витягування сталевго каната, тому роботу зосереджено на її модернізації, а не на проектуванні принципово нової конструкції. При цьому передбачено зміну лише витягувальної системи, без втручання в інші вузли лебідки – з метою збереження серійного виробництва та можливості оновлення старіших лебідок.

При детальному аналізі існуючої системи виявлено, що вона складається з надмірно великої кількості деталей, а канат завжди перегинається через привідне колесо за допомогою двох натяжних коліс – це скорочує строк його служби [2, 3, 10, 13]. Наявна конструкція має надто великі розміри: у верхній частині лебідки виникає відчуття перевантаженості та візуальної нестабільності. Крім того, вона обмежує робочу зону лебідки, що може призводити до зіткнень з конструкцією машини, зацмлення шлангів і навіть загрожувати безпеці оператора.

На рисунку 2.1 показано принцип роботи старого виконання, де два натяжних колеса спричиняють перегин каната.

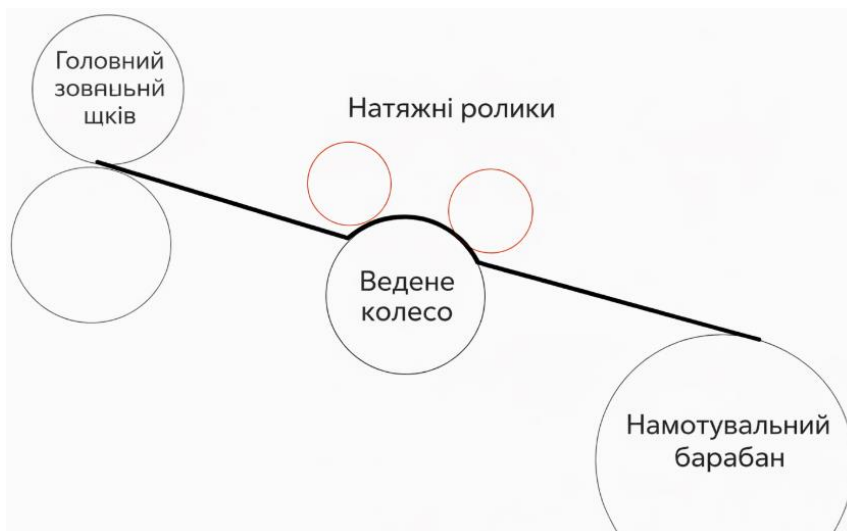


Рисунок 2.1 – Принцип роботи старого виконання

Цілями вдосконалення визначено: зменшення кількості деталей, усунення перегину каната, зменшення загальних розмірів конструкції, а також забезпечення гармонійної форми для органічного вписування шківів у загальний вигляд лебідки. Особлива увага має приділятися безпеці оператора та такому профілюванню конструкції, яке унеможливило б безпосередній контакт із небезпечними частинами системи.

Одне з можливих рішень для запобігання перегину каната через привідне колесо – використання лише одного натяжного колеса, при якому канат іде лінійно між головним шківом і барабаном. Це відображено на рисунку 2.2, де показано шлях каната без перегину через привідні колеса. Привідному механізму забезпечено переміщення у вертикальному напрямку для адаптації до діаметра барабана та положення підйомної платформи.

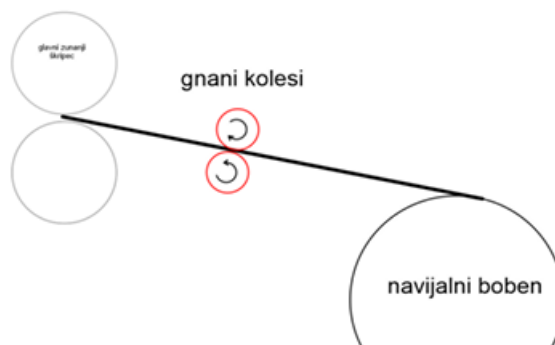


Рисунок 2.2 – Принцип роботи нової системи .

2.2. Розробка шківів та конструювання першого прототипу

Для основної несівної конструкції обрано дві сталеві пластини, між якими розміщено всі ключові компоненти – аналогічно підходу конкурентного підприємства. Мета – виготовити кожну пластину з одного листа сталі, що спрощує монтаж, прискорює та підвищує точність виготовлення. Це дозволяє уникнути зварювання, яке може спричинити зміщення при позиціонуванні та деформацію матеріалу внаслідок теплового впливу [7].

Пластини з'єднуються простими гвинтовими з'єднаннями, а необхідна відстань між ними забезпечується дистанційними втулками. Вони прості у виготовленні і добре виконують своє призначення [1, 14].

На рисунку 4.1 показано модель пластини, що забезпечує закріплення всіх ключових компонентів. Її продумана форма дозволяє конструкції органічно і функціонально вписатися в конструкцію лебідки та водночас сприяти її естетичному вигляду.

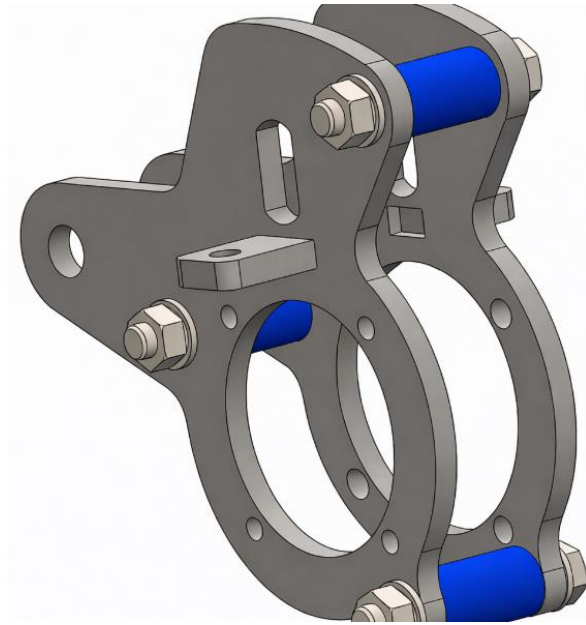


Рисунок 2.3 – Конструкція нової системи

Оскільки у новій системі канат не перегинається через привідне колесо, вдалося зменшити діаметр цього колеса зі 135 мм до 90 мм. Аналогічно зменшено діаметр натяжного колеса з 70 мм до 50 мм. Замість двох натяжних коліс, як у системі порівнюваного підприємства, використано лише одне. Таке рішення потребує більшого натяжного зусилля для досягнення тієї ж сили тертя [8].

Для компенсації більшого необхідного зусилля застосовано дві пружини замість однієї, які встановлено на зовнішній стороні корпусу. Це рішення не лише покращує функціональність, але й надає всьому вузлу більш охайного та естетичного вигляду (рисунок 2.4).

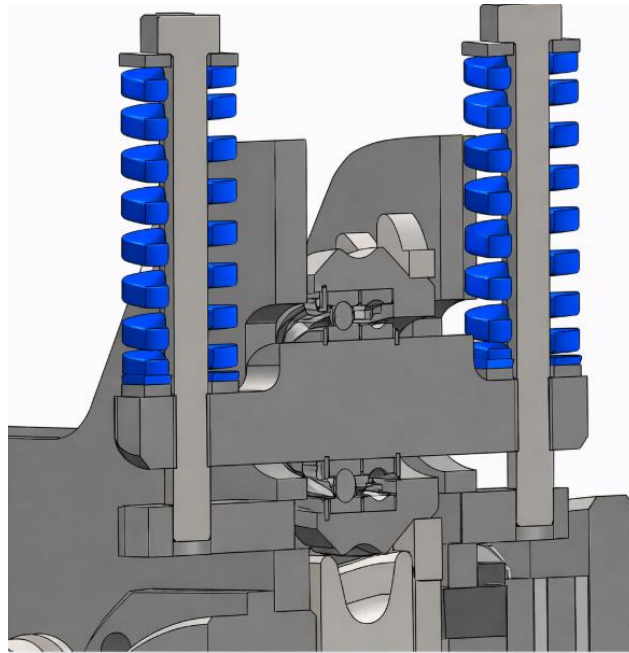


Рисунок 2.4 – Встановлення двох пружин.

Найбільшим викликом під час моделювання стала оптимізація ширини шківів. На якомога коротший вал необхідно закріпити гідродвигун, шестерню, ободок, підшипник і муфту. Це вимагало значних затрат часу, оскільки при кожній зміні виникала нова проблема: неможливість складання, труднощі виготовлення або зіткнення компонентів.

Проектування валу розпочато з встановлення гідродвигуна у вузол. З цією метою розроблено спеціальний конструктивний елемент, що виконує кілька функцій одночасно: служить як корпус підшипника та як кронштейн для кріплення гідродвигуна. Завдяки цьому на вісь двигуна діють лише крутні навантаження, що позитивно впливає на його довговічність. Елемент кріпиться до сталевій пластини, що забезпечує простий монтаж та швидку заміну (Рис 2.5) [2].

З новою системою вдалося зменшити висоту з 283 мм до 186 мм, ширину з 235 мм до 225 мм і довжину з 243 мм до 175 мм. Нова конструкція спрощує виробництво, підвищує надійність і сприяє кращому зовнішньому вигляду та безпечнішій експлуатації [2, 10, 30].

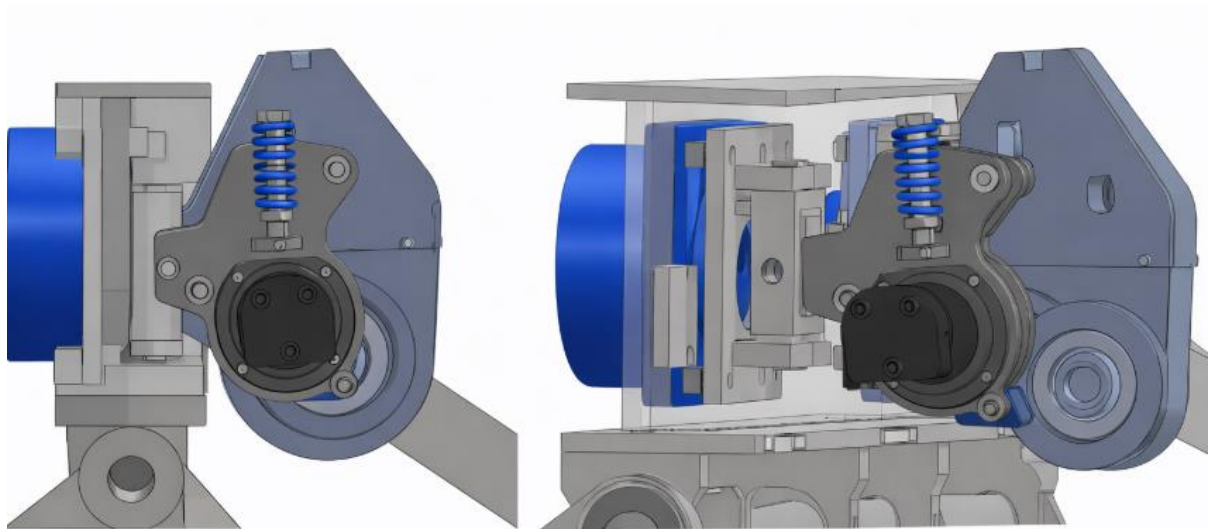


Рисунок 2.5. – Порівняння систем: старої та нової розробки

2.3. Числові симуляції та аналіз навантажень

Для перевірки відповідності розмірів осі проведено числові симуляції у програмі SolidWorks Simulation. Метою симуляції було оцінювання поведінки конструктивних елементів під навантаженнями, що виникають під час роботи лебідки. Метод скінченних елементів (МСЕ) дозволяє вже на стадії проектування передбачити напруження, деформації та прогин, а також своєчасно виявити потенційно критичні зони, зменшуючи ризик помилок та оптимізуючи конструкцію при мінімальних витратах на прототипування.

Параметри моделювання:

- Матеріал осі – конструкційна сталь S235, з можливістю подальшого переходу на матеріал вищої якості.

- Максимальне навантаження – 100 кН (власне зусилля витягування становить близько 80 кН; більше значення обрано для обліку можливих додаткових навантажень).

- У місцях підшипників задано закріплення (fixtures), що унеможливають трансляційні переміщення у всіх напрямках, але допускають обертання.

– Сітка побудована тетраедричними елементами другого порядку; в критичних зонах (контакт осі та колеса шківів) виконано згущення сітки (mesh refinement).

Числовий аналіз показав, що найбільші напруження в осі виникають у зоні передачі крутного моменту – безпосередньо в місці контакту осі та колеса шківів. Спочатку для осі передбачалася сталь S235, однак виявилось, що напруження при цьому є зависокими та можуть загрожувати безпечній роботі. Тому матеріал замінено на сталь C45 (1.1191) з границею плинності 565 МПа, яка більш придатна для осей і забезпечує суттєво вищу міцність.

Максимальне напруження за результатами симуляції становить близько 150 МПа, що складає приблизно 27% границі плинності матеріалу C45. Це означає, що конструкція залишається в пружній зоні, а запас міцності перевищує 3,7 – значно більше від мінімально необхідного значення 2. Аналіз прогинів показав, що максимальний прогин осі при максимальному навантаженні становить 0,023 мм. Таке відхилення є практично незначним і не впливає на точність передачі крутного моменту, спрацювання підшипників або правильну роботу лебідки [9, 28, 29, 30].

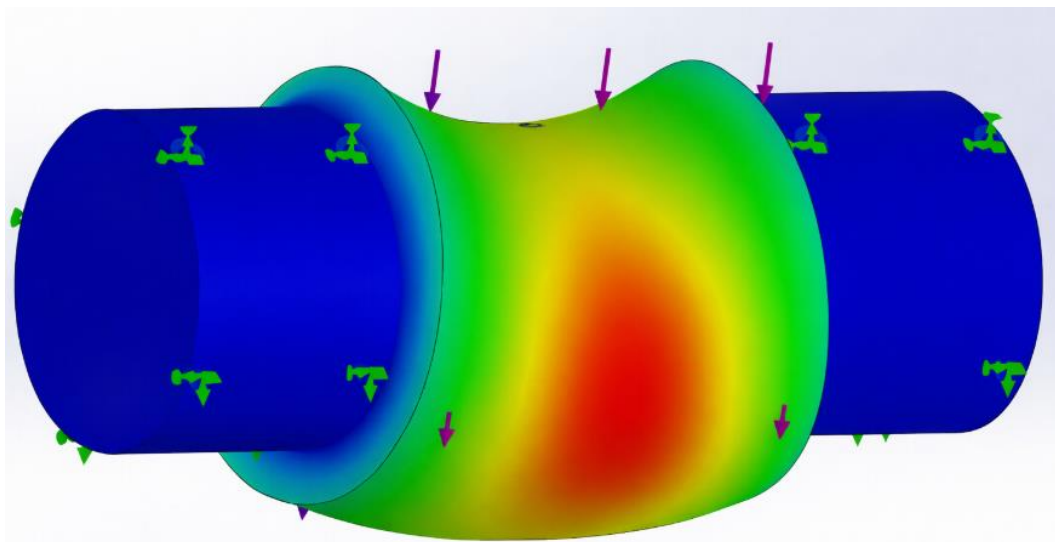


Рисунок 2.6 – Прогин осі при максимальному навантаженні .

2.4. Проектування шківа з електродвигуном

Розробка шківа для витягування сталевих канатів з лебідки, що приводиться електродвигуном, є сучасним рішенням із багатьма перевагами перед існуючими механічними або гідравлічними системами. Підприємство одразу підтримало розробку цієї ідеї, оскільки використання електричної сільськогосподарської та лісогосподарської техніки стрімко зростає [10, 12]. Зі збільшенням кількості електричних тракторів та інших машин потреба в електроприводних системах буде лише зростати.

Використання електродвигуна на лебідці має низку суттєвих переваг. Найбільша з них – простота передачі енергії від джерела до споживача. При електричному приводі енергія передається через прості кабелі, тоді як гідравлічні системи потребують шлангів із численними недоліками: вони незручні при монтажі та моделюванні, чутливі до пошкоджень і відносно дорогі. Для роботи гідравлічної системи також необхідні додаткові компоненти: муфти, коліна, кронштейни та ущільнення – все це підвищує складність і вартість системи.

Перша та найважливіша вимога – шків має бути нескінченно обертовим, що забезпечує витягування каната в усіх напрямках відносно положення трактора. Це призводить до першого суттєвого виклику: забезпечення підведення електричної енергії на обертову частину системи. Звичайний провід для цього не підходить, оскільки при обертанні він швидко пошкодиться або обірветься. Рис. 2.7).

Шків має складатися з двох коліс для перенаправлення каната, що дозволяють спрямовувати канат у будь-якому напрямку через одне або інше колесо. Одне з коліс приводиться електродвигуном, на іншому встановлено муфту або гальмо, здатне гальмувати намотування каната зусиллям 1000 Н [19].



Рисунок 2.7 – Схема роботи шківів з електродвигуном .

Підприємство хоче інтегрувати в механізм шківів кінцевий вимикач, що автоматично відключає намотування при наближенні кінцевого елемента каната до шківів. Таким чином суттєво подовжується строк служби лебідки, оскільки запобігаються непотрібні циклічні навантаження, що спричиняють втому матеріалу. Підприємство вже використовувало подібну систему в аналогічних застосуваннях, задіявши індуктивний датчик. Перевага індуктивного датчика – його компактність і простота інтеграції на найбезпечнішому місці, де він захищений від зовнішніх впливів у лісі: ударів, пилу, дощу або оливи [16, 19].

2.5. Розрахунок параметрів електродвигуна

Для забезпечення можливості вибору відповідного електродвигуна як альтернативи або доповнення до існуючого гідродвигуна, необхідно спочатку визначити характеристики наявного гідродвигуна BGM об'ємом 32 см³/об. Вхідні дані системи:

- максимальний тиск гідравлічної системи: 140 бар;
- максимальна витрата оливи: 20 л/хв.

За даними технічної документації виробника [11, 27], гідродвигун при цих умовах досягає: максимальна потужність – 2,75 кВт; крутний момент – 50 Н·м; частота обертання – 630 об/хв.

Розрахунок необхідної частоти обертання для забезпечення швидкості витягування 6 м/с:

$$n = (60 \cdot v) / (\pi \cdot D_2) = (60 \cdot 6) / (\pi \cdot 0,135) \approx 848,83 \text{ об/хв}$$

де: $v = 6 \text{ м/с}$ – швидкість витягування; $D_2 = 0,135 \text{ м}$ – діаметр колеса шківів.

Це означає, що для забезпечення максимальної швидкості витягування 6 м/с двигун повинен обертатися зі швидкістю близько 848 об/хв , що перевищує можливості наявного гідродвигуна. Система первинно призначена для допомоги при розмотуванні барабана, де вимоги суттєво нижчі – робота зазвичай виконується зі швидкістю близько 2 м/с .

З діаграми характеристик двигуна при умовах гідравлічної системи лебідки двигун досягає близько 570 об/хв та потужності $2,8 \text{ кВт}$ [13, 14]. На підставі цих даних можна стверджувати, що замінний електродвигун повинен забезпечувати щонайменше 3 кВт потужності.

При наявному живленні напругою 12 В (доступне на будь-якому тракторі) потужність 3 кВт при такій низькій напрузі означає дуже великий струм (близько 250 А), що ускладнює розмірування електричного кабелю, захисту та системи живлення. Жоден стандартний роз'єм трактора не розрахований на такі великі струми.

Прийнято компроміс: максимальна швидкість системи зменшена до 3 м/с . При цьому зменшується і необхідна механічна потужність двигуна, що уможливорює використання легше доступного і простішого в інтеграції двигуна при обмеженому живленні. Вимога підприємства 6 м/с відповідає швидкості близько $21,6 \text{ км/год}$ – швидкості бігу пересічної людини. Двигун для розмотування каната в 99% випадків призначений для допомоги при прокладанні каната схилом, де швидкість людини рідко перевищує 2 м/с . Тому зменшення швидкості не є суттєвою проблемою [12].

На підставі цих висновків обрано 12В постійнострумовий електродвигун марки MDN114-1 виробника Wuxi Jinle Automobile Motor Factory. При напрузі живлення 12 В та струмі 136 А він забезпечує номінальну потужність $1,6 \text{ кВт}$. Номінальна частота обертання становить

приблизно 2800 об/хв, що відповідає потребам системи. Розрахований номінальний крутний момент становить близько 5,5 Н·м, що достатньо для передачі потужності на привідний шків [13, 14].

2.6. Геометричне моделювання другого прототипу

Моделювання розпочато з кріпильної пластини, що з'єднує весь шків із корпусом лебідки. На відміну від існуючого рішення підприємства (виготовлення з одного суцільного куска з видаленням великої кількості матеріалу), у новому варіанті кріпильна пластина складається з двох частин (рисунок 2.8), що зварюються між собою, забезпечуючи дешевше та швидше виробництво [17].

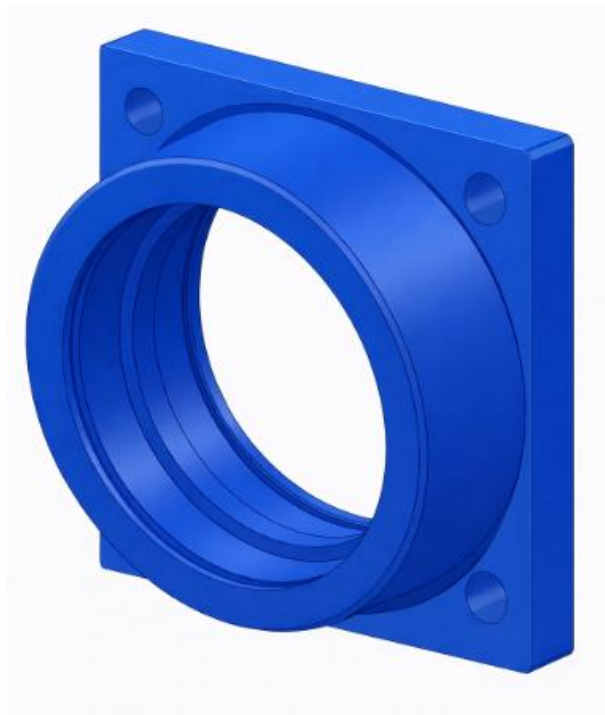


Рисунок 2.8 – Кріпильна пластина .

Перший виклик полягав у кріпленні двигуна до шківа. Після створення 3D-моделі двигуна за кресленнями виробника розроблено кріпильний елемент, аналогічний тому, що використовується в гідравлічній системі (рисунок 2.9). Цей елемент виконує кілька завдань одночасно: слугує корпусом підшипника, тримачем двигуна та елементом кріплення вузла до конструкції.

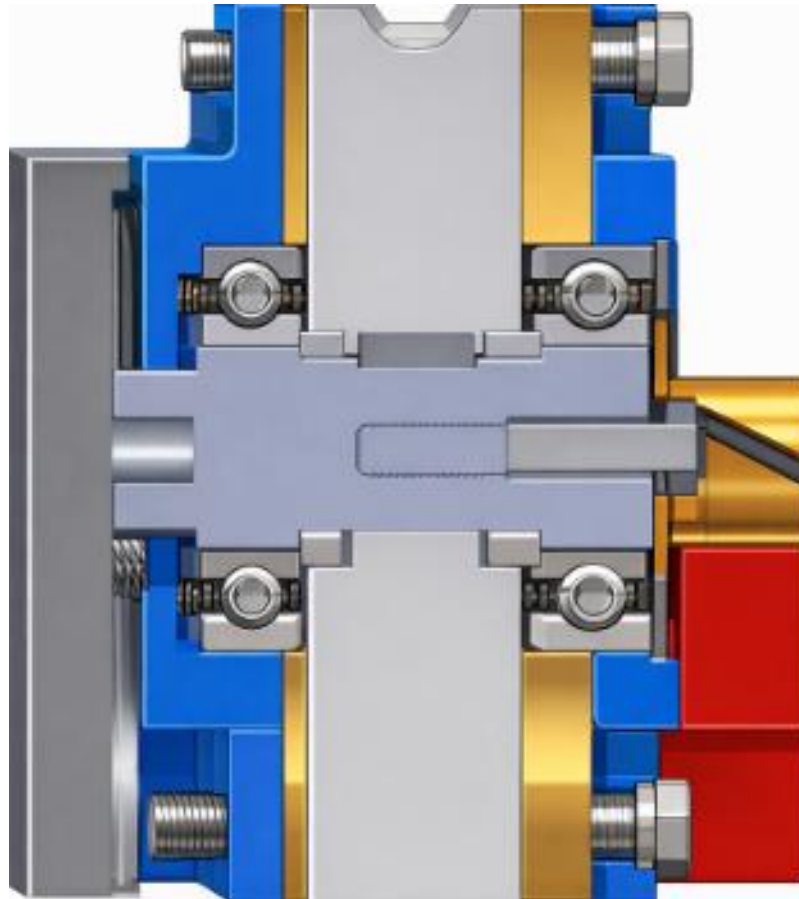


Рисунок 2.9 – Багатофункціональний кріпильний елемент .

Підприємство хотіло забезпечити зупинку намотувального барабана до того, як кінець каната вдариться в шків. Для цього розроблено систему визначення кінцевого положення за допомогою індуктивного давача. На шків встановлено два допоміжних ролики, що направляють канат у напрямку витягування. При наближенні кінця каната до ролика той переміщується в кінцеве положення. У цьому положенні кронштейн наближається до індуктивного давача, який фіксує переміщення та надсилає сигнал до контролера. (Рис 2.10), Контролер відключає намотувальний барабан, запобігаючи можливим пошкодженням шківа. Коли канат знову розмотується, кронштейн повертається у вихідне положення за допомогою пружини [18].



Рисунок 2.10 – Система відключення намотування .

Для передачі електричного струму на обертову частину виявлено та обрано найбільш поширене та перевірене рішення – пристрій під назвою ковзне кільце (slip ring). Ковзне кільце складається з кілець, встановлених на обертовій частині, та щіток, що торкаються кілець із нерухомої частини (рисунок 2.11). Кільця та щітки разом забезпечують безперервний електричний контакт між рухомою та нерухомою частинами навіть під час обертання. Пристрій є простим, надійним і широко використовується в промисловості для передачі живлення або сигналів на обертові елементи [19].

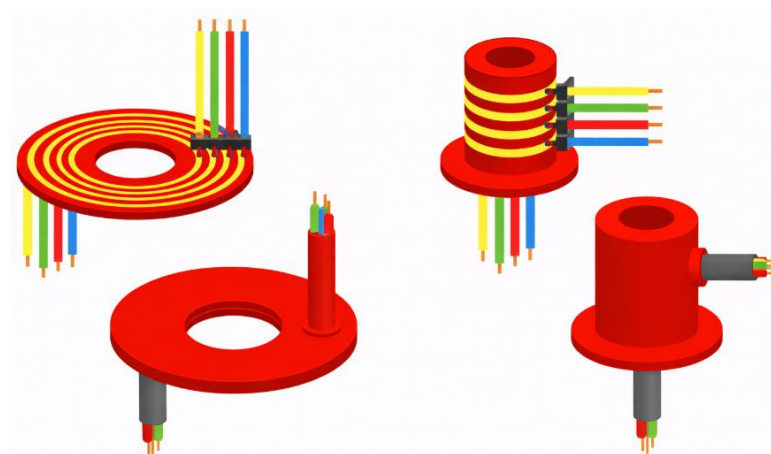


Рисунок 2.11 — Принцип роботи системи ковзного кільця (джерело: [27])

Ковзне кільце встановлено на задній стороні шківів, між самим шківом та кріпильною пластиною. Діаметр обраної системи передачі енергії становить 210 мм, що забезпечує достатню контактну площу між ковзними контактами. Якщо виявиться потреба у більшій контактній поверхні (наприклад, через нагрівання чи іскріння), конструкцію можна просто доопрацювати, додавши ще щітки. (Рис 2.12). У разі потреби в додатковому давачі чи споживачеві на системі ковзного кільця можна просто додати ще одне ковзне кільце, що дозволить керувати додатковими компонентами без труднощів [19].



Рисунок 2.12 — Ковзне кільце на шківі .

3. ОХОРОНА ПРАЦІ

3.1. Загальні вимоги безпеки при роботі з лісовими лебідками

Лісова лебідка є машиною підвищеної небезпеки, що працює з великими навантаженнями (до 85 кН) та динамічними навантаженнями, тому всі конструктивні рішення повинні відповідати чинним нормативам у галузі охорони праці. Основні вимоги безпеки регламентуються директивами ЄС щодо машинного обладнання (Machine Directive 2006/42/EC), стандартами EN ISO 4301 та ISO 4309, а також відповідними локальними нормативними актами.

3.2. Захист від контакту з рухомими частинами

Привідний шків є механізмом із постійно обертовими деталями (колесо, вал, зубчасте колесо, муфта), що становлять значну небезпеку при безпосередньому контакті. При проектуванні нових прототипів передбачено такі заходи захисту:

- Профілювання зовнішньої форми шківа таким чином, щоб виключалося випадкове торкання оператором до небезпечних деталей під час штатної роботи. Форма пластин корпусу спеціально спроектована для запобігання потраплянню рук у зону обертових деталей.

- Застосування кожухів та захисних кришок над ключовими вузлами, зокрема над гідродвигуном (або електродвигуном), зубчастою передачею та муфтою. Кожух виконує подвійну функцію: захищає деталі від механічних пошкоджень (каміння, гілок, бруду) та запобігає контакту оператора з рухомими частинами.

- Монтаж ковзного кільця (slip ring) у захищеному корпусі, що унеможлиблює контакт з електричними провідниками під напругою та обертовими елементами.

- Забезпечення достатньої відстані між зовнішніми поверхнями шківа та рамою лебідки для виключення зіткнень у всьому діапазоні переміщень

підйомної платформи (кути відхилення за горизонталлю 15° , за вертикаллю 45°).

3.3. Заходи запобігання мимовільному руху сталевому каната

Неконтрольований рух навантаженого сталевому каната становить серйозну небезпеку для оператора та оточуючих. Конструкцією передбачено такі запобіжні заходи:

- Вбудоване механічне попереднє гальмо з гальмівним зусиллям близько 1000 Н (100 кг) для контрольованого гальмування каната при його намотуванні. Конструкція гальма забезпечує утримання навантаження у статичному стані навіть при відмові гідравлічного приводу.

- Кінцевий вимикач (індуктивний давач), що автоматично зупиняє намотування при досягненні кінцем каната зони шківів. Система повертається у вихідне положення лише після ручного скидання або відмотування каната, що унеможливорює повторне автоматичне включення без контролю оператора.

- Система компенсації довжини каната при зміні положення підйомної платформи – запобігає утворенню слабину або перетягуванню каната при маневруванні, що знижує ризик мимовільного зриву навантаження.

3.4. Вимоги до монтажу та технічного обслуговування

Операції монтажу та обслуговування лебідки виконуються у польових умовах, нерідко на стрімких лісових схилах, тому конструкція повинна мінімізувати час виконання регламентних операцій та ризики при їх проведенні:

- Монтаж сталевому каната на шків має виконуватися без спеціального інструменту та займати не більше 60 секунд. Це зменшує час перебування оператора у небезпечній зоні поблизу навантаженого обладнання.

- Кріплення шківів до лебідки здійснюється не більше ніж чотирма болтами стандартних розмірів – забезпечує швидке та надійне закріплення без ризику неправильного монтажу.

- При технічному обслуговуванні (змащення, перевірка стану пружин, ковзного кільця, кабельних з'єднань) необхідно знеструмити систему та зняти тиск із гідравлічної магістралі. Конструкція забезпечує зручний доступ до ключових вузлів технічного обслуговування.

- Дистанційні втулки та посадочні місця деталей спроектовані з урахуванням однозначної орієнтації: неправильний монтаж конструктивно унеможливлений, що знижує ризик помилки при польовому складанні.

3.5. Електробезпека (для другого прототипу)

Застосування електродвигуна та ковзного кільця вимагає виконання вимог електробезпеки:

- Струмопровідні частини системи захищені корпусом із ступенем захисту не нижче IP54 (захист від пилу та бризок). Це забезпечує безпечну роботу в умовах лісу (дощ, бруд, висока вологість).

- Номінальний струм системи (136 А при 12 В) вимагає застосування кабелів відповідного перерізу та захисного пристрою (запобіжника або автоматичного вимикача) на стороні трактора.

- Система ковзного кільця захищена від прямого контакту кожухом, знімним лише за допомогою інструменту. Електричні підключення виконані ізольованими роз'ємами з надійним фіксатором.

- Перед початком монтажу або обслуговування системи необхідно відключити акумулятор трактора. Це унеможливорює мимовільний запуск двигуна та ураження електричним струмом.

4. ОБҐРУНТУВАННЯ ДОСЯГНУТИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

4.1. Порівняння систем та технічні результати

На початку роботи проведено огляд рішень конкурентних виробників (Igland, Pfanzelt, Uniforest), у результаті якого встановлено, що більшість із них використовує гідравлічний привід. Такі конструкції є надійними, однак вимагають великої кількості компонентів (шланги, клапани, ущільнення), що підвищує витрати та ймовірність відмов. Крім того, багато виробів мають значні габарити, що обмежує робочу зону лебідки та спричиняє зіткнення компонентів. З огляду на це у роботі реалізовано рішення, що є компактнішими, простішими у монтажі й безпечнішими в експлуатації.

При розробці першого рішення здійснено модернізацію наявної системи. Результати числових симуляцій підтверджують достатню жорсткість конструкції: напруження залишаються суттєво нижче границі плинності матеріалу, а прогини – незначними. Максимальне напруження 150 МПа становить лише 27% від границі плинності сталі С45 (565 МПа), що забезпечує запас міцності більше 3,7 при мінімально необхідному значенні 2. Максимальний прогин осі 0,023 мм є практично незначним і не впливає на роботу системи. Зменшення кількості деталей спрощує складання – це ключова перевага для серійного виробництва.

Крім кількісних показників міцності, перший прототип демонструє суттєве зменшення габаритних розмірів: висота зменшена з 283 мм до 186 мм (на 34%), ширина з 235 мм до 225 мм (на 4,3%), довжина з 243 мм до 175 мм (на 28%). Це безпосередньо збільшує робочу зону лебідки та виключає зіткнення в крайніх положеннях підйомної платформи.

Другий прототип є інновацією: привід і гальмо встановлено безпосередньо на зовнішній шків, використовуючи електродвигун. Досягнуто нескінченну обертовість шківа, яку гідравлічні конструкції не забезпечують. Додані індуктивний давач і кінцевий вимикач підвищують безпеку та довговічність лебідки. При визначенні швидкості витягування

необхідно було піти на компроміс: бажана швидкість 6 м/с вимагала б надпотужного і дорогого двигуна, тому її знижено до 3 м/с. Це значення є практично придатним, оскільки відповідає реальним робочим швидкостям у лісі.

4.2. Економічна оцінка

При розробці нової системи, окрім технічних покращень, ключовою є перевірка економічної доцільності змін. З цією метою порівняно витрати на наявну систему шківа та на нову конструкцію. Мета аналізу — визначити, яка з двох систем є більш придатною для виробництва з точки зору витрат на виготовлення та довгострокової економічності [20].

При порівнянні враховуються такі чинники: вартість матеріалів (сталеві пластини, підшипники, додаткові елементи); витрати на обробку та виготовлення (різання, зварювання, складання); витрати на додаткові компоненти (давачі, ковзне кільце, гідродвигун); витрати на обслуговування та надійність; довгострокова економія завдяки простішому складанню та менших похибок виробництва.

Вартість матеріалу визначено на основі маси використаного матеріалу з надбавкою 10% на відходи при обробці. Передбачається виготовлення всіх деталей шківа зі сталі S235 з густиною 7,85 кг/дм³. Поточна ринкова ціна сталі становить приблизно 1 €/кг [21].

Результати економічного аналізу узагальнено в таблиці 4.1.

З таблиці видно, що нова система шківа є дорожчою насамперед через додаткові компоненти — ковзне кільце, індуктивний давач та інші вдосконалення. Саме це і приносить ключові переваги: нова система є зручнішою в експлуатації, безпечнішою та надійнішою, забезпечує кращий контроль, меншу ймовірність відмов і простіше управління.

Таблиця 4.1 – Економічний аналіз порівняння систем (розробка автора на основі [20, 21])

Стаття витрат	Стара система (€)	Нова система (€)	Різниця (€)
Матеріал (сталь, пластини)	50,64	53,87	+3,23
Обробка та складання	518,23	446,28	-71,95
Додаткові компоненти (давачі, двигун тощо)	140,00	300,00	+160,00
Технічне обслуговування (термін служби)	100,00	200,00	+100,00
Разом	808,87	1000,15	+191,28

Слід зазначити, що реальні переваги нової системи можна оцінити лише після фізичного тестування, а економічна оцінка стане точнішою. Очікується, що вже при невеликих серіях виробництва ціни знизяться приблизно на 20%. Хоча початкові інвестиції перевищують витрати старої системи, нові функціональні можливості обґрунтовують вкладення, оскільки система в довгостроковій перспективі забезпечує більшу ефективність і надійну роботу.

ВИСНОВКИ

За результатами виконання дипломної роботи досягнуто всіх поставлених цілей: розроблено два прототипні моделі шківів для лісових лебідок, що пропонують нові рішення для безпечнішої та ефективнішої роботи. Обидва прототипи представлено підприємству-замовнику для оцінки придатності запропонованих рішень та їх можливого впровадження у подальший розвиток продукту.

На початку роботи проведено аналіз існуючих рішень конкурентних виробників (Igland, Pfanzelt, Uniforest) та встановлено, що більшість з них використовує гідравлічний привід. Такі конструкції є надійними, але вимагають великої кількості компонентів, що підвищує витрати та ймовірність відмов. Проаналізовані вироби мають значні габарити, що обмежує робочу зону лебідки та призводить до зіткнень компонентів.

Перший прототип – модернізована версія наявної системи. Числові симуляції підтвердили достатню міцність конструкції: максимальне напруження 150 МПа при запасі міцності 3,7 та максимальний прогин осі 0,023 мм. Зменшення габаритів (висота з 283 мм до 186 мм, довжина з 243 мм до 175 мм) збільшило робочу зону та виключило зіткнення в робочому діапазоні.

Другий прототип є інновацією: реалізовано нескінченно обертовий шків із електроприводом і системою автоматичного відключення намотування через індуктивний давач. Це відкриває принципово новий спосіб роботи з електроприводним шківом, якого жодне з проаналізованих конкурентних рішень не пропонує.

Економічний аналіз показав, що нова система дорожча на 191,28 € (23,6%), переважно через ковзне кільце та індуктивний давач. Однак ці компоненти забезпечують суттєві переваги в безпеці, надійності та зручності експлуатації, що обґрунтовує додаткові витрати. При серійному виробництві очікується зниження ціни приблизно на 20%.

Обмеженням роботи є відсутність фізичних прототипів та їх реального тестування. Подальший розвиток повинен включати виготовлення прототипів, польові випробування, перевірку довговічності матеріалів та оптимізацію окремих компонентів – зокрема механізму ковзного кільця та системи гальмування.

Сподіваємося, що запропоновані ідеї сприятимуть вдосконаленню існуючих систем і слугуватимуть інженерам-конструкторам підприємства корисним вихідним матеріалом при розробці майбутніх моделей лісових лебідок.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Анур'єв В. І. Довідник конструктора-машинобудівника : у 3 т. – Москва : Машинобудування, 2006. – 728 с.
2. Кудрявцев В. Н., Державець Ю. А. Деталі машин : підручник. – Київ : Вища школа, 2005. – 560 с.
3. Балака М. М., Іщенко О. О. Гідравлічні та пневматичні приводи машин. – Харків : ХНАДУ, 2012. – 312 с.
4. Кухар В. П. Теорія механізмів і машин. – Київ : Либідь, 2004. – 448 с.
5. Попов В. Л. Механіка матеріалів та елементи конструкцій. – Київ : НТУУ «КПІ», 2011. – 396 с.
6. Шигін А. С. Лісові машини та обладнання. – Київ : Урожай, 2008. – 432 с.
7. Дерев'янка І. О. Машини та обладнання лісового господарства. – Львів : ЛНАУ, 2015. – 365 с.
8. Beer F. P., Johnston E. R., DeWolf J. T. Mechanics of Materials. – New York : McGraw-Hill, 2014. – 896 p.
9. Budynas R., Nisbett J. Shigley's Mechanical Engineering Design. – New York : McGraw-Hill, 2015. – 1100 p.
10. Norton R. Machine Design: An Integrated Approach. – Pearson Education, 2013. – 1050 p.
11. Hibbeler R. Engineering Mechanics: Statics and Dynamics. – Pearson, 2016. – 1344 p.
12. Oberg E., Jones F., Horton H. Machinery's Handbook. – New York : Industrial Press, 2016. – 2840 p.
13. Bhandari V. B. Design of Machine Elements. – New Delhi : McGraw-Hill, 2010. – 1030 p.
14. Hamrock B. J., Schmid S. R., Jacobson B. O. Fundamentals of Machine Elements. – New York : McGraw-Hill, 2005. – 756 p.

15. Gere J., Goodno B. Mechanics of Materials. – Boston : Cengage Learning, 2012. – 912 p.
16. ISO 4309:2017 Cranes – Wire ropes – Care and maintenance, inspection and discard.
17. ISO 2408:2017 Steel wire ropes – Requirements.
18. EN 14492-1:2019 Power driven winches and hoists – Safety requirements.
19. Balluff GmbH. Inductive Sensors – Technical Guide. – Germany, 2023.
20. BGB Innovation. Slip Rings – Technical Guide. – United Kingdom, 2022.
21. Certex Group. Steel Wire Rope Technical Manual. – United Kingdom, 2021.
22. SolidWorks Corporation. SolidWorks Simulation User Guide. – Dassault Systèmes, 2022.
23. Pfanzelt Maschinenbau. Forestry Winches Technical Catalogue. – Germany, 2023.
24. Igland Group. Forestry Winch Product Catalogue. – Norway, 2022.
25. Uniforest d.o.o. Forestry Equipment Catalogue. – Slovenia, 2023.
26. Rositeh. Hydraulic Motor MM32 – Technical Documentation. – Slovenia, 2022.
27. Bhandari V. B. Hydraulic Machines. – McGraw-Hill Education, 2012.
28. Gudehus G., Nackenhorst U. Computational Mechanics. – Berlin : Springer, 2010.
29. Cook R. D. Concepts and Applications of Finite Element Analysis. – New York : Wiley, 2007.
30. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L. The Finite Element Method. – Oxford : Butterworth-Heinemann, 2005.