

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ЛІСОТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

Навчально-науковий інститут інженерної механіки, автоматизації та
комп'ютерно-інтегрованих технологій

Кафедра аграрної та лісової інженерії

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи на тему

Розроблення інженерно-технічних заходів щодо підвищення надійності вантажопідіймального устаткування в умовах інтенсивної експлуатації.

Виконав: студент групи ІН-61м
спеціальності 133 Галузеве
машинобудування,
освітньо-професійної програми
Промисловий інжиніринг
Вернігоров О. С.

Керівник: Бакай Б. Я.

Рецензент: Павлюк Р. В.
(прізвище та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ЛІСОТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

Навчально-науковий інститут інженерної механіки, автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Кафедра аграрної та лісової інженерії


Рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень

Спеціальність 133 Галузеве машинобудування

Освітньо-професійна програма Промисловий інжиніринг

ЗАТВЕРДЖУЮ

В. о. завідувача кафедри АЛІ


доц. Бакай Б. Я.
"02" жовтня 2025 року

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Вернігорову Олегу Сергійовичу

1. Тема роботи Розроблення інженерно-технічних заходів щодо підвищення надійності вантажопідіймального устаткування в умовах інтенсивної експлуатації.

керівник роботи Бакай Борис Ярославович, канд. техн. наук.
затвержені наказом університету від "29" липня 2025 року № С-462

2. Термін подання студентом роботи 16 грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи базове підприємство – ТОВ "Мастерс Палет"; об'єкт дослідження – вантажопідіймальне устаткування маніпуляторного типу, що експлуатується в умовах інтенсивних навантажень; матеріал металоконструкцій Strenx 500/700/900; робоче навантаження 2000 кг та радіуси вильоту 3-8 м; режим роботи – інтенсивна експлуатація.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналіз умов експлуатації та проблем надійності вантажопідіймального устаткування маніпуляторного типу

2. Теоретичні основи та розрахункові моделі оцінювання надійності вантажопідіймальних маніпуляторів

3. Розроблення інженерно-технічних заходів щодо підвищення надійності вантажопідіймального устаткування

4. Висновки

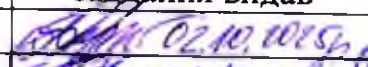
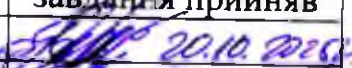
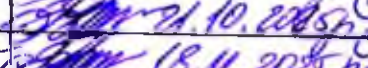
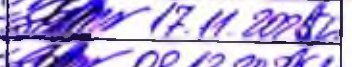
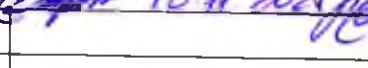
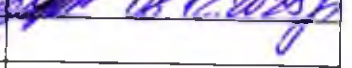
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1. Креслення загального виду вантажопідіймального маніпулятора (із зазначенням основних габаритів і вузлів).

2. Графіки розрахункових залежностей для вихідної та удосконаленої конструкцій.

3. Графіки втомної довговічності металоконструкцій.

6. Консультанти розділів роботи


Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Бакай Б. Я., в. о. зав. кафедри	 02.10.2025 р.	 20.10.2025 р.
2	Бакай Б. Я., в. о. зав. кафедри	 21.10.2025 р.	 17.11.2025 р.
3	Бакай Б. Я., в. о. зав. кафедри	 18.11.2025 р.	 08.12.2025 р.

7. Дата видачі завдання 02.10.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Ч. ч.	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз умов експлуатації та проблем надійності вантажопідіймального устаткування маніпуляторного типу	02.10.2025-20.10.2025 р.	
2	Теоретичні основи та розрахункові моделі оцінювання надійності вантажопідіймальних маніпуляторів	21.10.2025-17.11.2025 р.	
3	Розроблення інженерно-технічних заходів щодо підвищення надійності вантажопідіймального устаткування	18.11.2025-08.12.2025 р.	
4	Формування висновків та оформлення кваліфікаційної роботи	09.12.2025-15.12.2025 р.	

Студент


(підпис)

Вернігоров О. С.

Керівник роботи


(підпис)

Бакай Б. Я.

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра: 80 с., 3 ч., 12 табл., 10 рис., 3 дод., 13 джерел.

Тема: Розроблення інженерно-технічних заходів щодо підвищення надійності вантажопідіймального устаткування в умовах інтенсивної експлуатації.

НАДІЙНІСТЬ УСТАТКУВАННЯ, ВАНТАЖОПІДІЙМАЛЬНИЙ МАНІПУЛЯТОР, ІНТЕНСИВНА ЕКСПЛУАТАЦІЯ, ВТОМНА ДОВГОВІЧНІСТЬ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ, ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНІ ЗАХОДИ.

Об'єкт дослідження – вантажопідіймальне устаткування маніпуляторного типу, що експлуатується в умовах інтенсивних навантажень.

Мета роботи – Підвищення надійності вантажопідіймального устаткування маніпуляторного типу шляхом розроблення та обґрунтування інженерно-технічних заходів, спрямованих на зниження напруженого стану, підвищення втомної довговічності металоконструкцій

Методи дослідження – системний аналіз, математичне моделювання, кінематичний аналіз, розрахунково-аналітичні методи.

Магістерська робота присвячена обґрунтуванню інженерно-технічних заходів щодо підвищення надійності вантажопідіймального устаткування маніпуляторного типу в умовах інтенсивної експлуатації. Проаналізовано умови роботи маніпуляторів, основні види відмов металоконструкцій, гідроприводів і з'єднань, а також чинники, що впливають на їхню надійність і довговічність.

На основі розрахунково-аналітичних моделей виконано оцінювання напружено-деформованого стану та втомної довговічності елементів маніпулятора. Запропоновано конструктивні та експлуатаційні заходи з підвищення надійності металоконструкцій і гідроприводів. Результати показали зниження напружень, зростання ресурсу та підвищення коефіцієнта технічної готовності, що підтверджує практичну доцільність упровадження отриманих рішень.

ABSTRACT

Master's degree graduation thesis: 80 p., 3 ch., 12 tbl., 10 ill., 3 add., 13 literature sources.

Thesis topic: Development of engineering and technical measures to improve the reliability of lifting equipment under intensive operating conditions.

RELIABILITY OF EQUIPMENT, MANIPULATOR-TYPE LIFTING EQUIPMENT, INTENSIVE OPERATION, FATIGUE LIFE OF METAL STRUCTURES, ENGINEERING AND TECHNICAL MEASURES.

Study subject – Manipulator-type lifting equipment operated under intensive loading conditions.

Research objective – To improve the reliability of manipulator-type lifting equipment by developing and substantiating engineering and technical measures aimed at reducing stress levels, increasing fatigue life of metal structures.

Research methods – systems analysis, mathematical modelling, kinematic analysis, and analytical calculation methods.

The master's thesis is devoted to substantiating engineering and technical measures aimed at improving the reliability of manipulator-type lifting equipment under intensive operating conditions. The operating conditions of manipulators, the main failure modes of metal structures, hydraulic drives and joints, as well as the factors affecting their reliability and durability, are analysed.

Based on analytical and calculation models, the stress–strain state and fatigue life of the manipulator components are evaluated. Design-related and operational measures to enhance the reliability of metal structures and hydraulic drives are proposed. The results demonstrate a reduction in stress levels, an increase in service life, and an improvement in the technical availability factor, confirming the practical feasibility of implementing the proposed solutions.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 АНАЛІЗ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА ПРОБЛЕМ НАДІЙНОСТІ ВАНТАЖОПІДІЙМАЛЬНОГО УСТАТКОВАННЯ МАНІПУЛЯТОРНОГО ТИПУ	10
1.1 Загальна характеристика вантажопідіймального устаткування маніпуляторного типу та сфери його застосування	10
1.2 Умови інтенсивної експлуатації маніпуляторів у складських та виробничо-логістичних системах	12
1.3 Основні види відмов та пошкоджень елементів вантажопідіймального устаткування	16
1.4 Аналіз факторів, що впливають на надійність металоконструкцій, гідроприводів і вузлів з'єднання	20
1.5 Нормативні вимоги та критерії оцінювання надійності вантажопідіймального устаткування	25
1.6 Постановка науково-технічної задачі підвищення надійності маніпуляторів в умовах інтенсивної експлуатації	28
2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА РОЗРАХУНКОВІ МОДЕЛІ ОЦІНЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ ВАНТАЖОПІДІЙМАЛЬНИХ МАНІПУЛЯТОРІВ	31
2.1 Програма та методика розрахункового дослідження надійності вантажопідіймальних маніпуляторів	31
2.2 Теоретичні положення теорії надійності машин і механізмів	33
2.3 Кінематичні та силові особливості роботи вантажопідіймальних маніпуляторів	35
2.4 Формування розрахункових схем маніпуляторного устаткування	38
2.5 Навантажувальні режими та напружено-деформований стан елементів вантажопідіймального маніпулятора при інтенсивній експлуатації	40

2.6	Оцінювання втомної міцності та довговічності металоконструкцій	43
2.7	Розрахунок показників надійності гідравлічних елементів маніпулятора	46
2.8	Отримання функціональних залежностей між експлуатаційними навантаженнями, напруженнями та показниками надійності	48
3 РОЗРОБЛЕННЯ ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНИХ ЗАХОДІВ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВАНТАЖОПІДІМАЛЬНОГО УСТАТКОВАННЯ		51
3.1	Обґрунтування напрямів підвищення надійності маніпуляторного устаткування	51
3.2	Удосконалення конструктивних рішень елементів вантажопідіймального маніпулятора	53
3.3	Розрахункове обґрунтування підвищення міцності та довговічності металоконструкцій	55
3.4	Інженерно-технічні заходи щодо підвищення надійності гідроприводів і з'єднань	63
3.5	Комплексна оцінка ефективності інженерно-технічних заходів щодо підвищення надійності вантажопідіймального устаткування	67
3.6	Охорона праці, навколишнього середовища та безпека в надзвичайних ситуаціях	70
ВИСНОВКИ		73
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ		75
ДОДАТКИ		77

ВСТУП

Інтенсивний розвиток складських, виробничо-логістичних і лісопромислових систем зумовлює широке впровадження вантажопідіймального устаткування маніпуляторного типу, яке забезпечує високу гнучкість вантажообробних операцій, скорочення тривалості технологічних циклів і зменшення потреби в допоміжних механізмах. Разом з тим зростання інтенсивності експлуатації, підвищення робочих швидкостей, збільшення радіусів вильоту та мас переміщуваних вантажів призводять до суттєвого ускладнення умов роботи маніпуляторів і значного зростання навантажень на їхні металоконструкції, гідроприводи та вузли з'єднання.

Практика експлуатації вантажопідіймального устаткування свідчить, що саме надійність є визначальним фактором його ефективності та безпеки. Передчасні відмови, прискорене втомне руйнування металоконструкцій, витіки робочої рідини та зношування шарнірних з'єднань не лише знижують технічну готовність обладнання, але й призводять до зростання експлуатаційних витрат, простоїв і підвищених виробничих ризиків. У цих умовах традиційні підходи, орієнтовані переважно на забезпечення статичної міцності або використання матеріалів підвищеної міцності без комплексного аналізу навантажувальних режимів, виявляються недостатніми.

Особливої актуальності набуває необхідність у науково обґрунтованому розробленні інженерно-технічних заходів, спрямованих на підвищення надійності вантажопідіймального устаткування саме в умовах інтенсивної експлуатації. Така постановка проблеми передбачає врахування циклічного характеру навантажень, впливу концентрацій напружень, динамічних ефектів у гідроприводі та взаємозв'язку між конструктивними, технологічними й експлуатаційними чинниками. Комплексний підхід до підвищення надійності дозволяє перейти від реактивної моделі експлуатації, заснованої на усуненні наслідків відмов, до превентивної моделі, орієнтованої на прогнозування ресурсу та керування технічним станом устаткування.

Практична значущість досліджень у цьому напрямі зумовлена можливістю підвищення ресурсу основних елементів маніпуляторів без істотного ускладнення конструкції або значного зростання маси. Обґрунтоване зниження рівня напружень, оптимізація геометрії металоконструкцій, стабілізація режимів роботи гідроприводів і підвищення довговічності з'єднань створюють передумови для зменшення кількості відмов, подовження міжремонтних інтервалів і підвищення коефіцієнта технічної готовності вантажопідіймального устаткування. Це має безпосередній економічний ефект за рахунок скорочення витрат на ремонт і простої, а також сприяє підвищенню рівня виробничої безпеки.

Отже, потреба в системному інженерно-технічному обґрунтуванні заходів щодо підвищення надійності вантажопідіймального устаткування маніпуляторного типу є об'єктивною і зумовлена сучасними умовами його експлуатації. Реалізація таких підходів дозволяє поєднати вимоги міцності, довговічності, безпеки та економічної доцільності, що визначає актуальність і практичну значущість виконаної магістерської роботи.

1 АНАЛІЗ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА ПРОБЛЕМ НАДІЙНОСТІ ВАНТАЖОПІДІЙМАЛЬНОГО УСТАТКОВАННЯ МАНІПУЛЯТОРНОГО ТИПУ

1.1 Загальна характеристика вантажопідіймального устаткування маніпуляторного типу та сфери його застосування

Вантажопідіймальне устаткування маніпуляторного типу посідає важливе місце у сучасних виробничих, складських та логістичних системах, оскільки поєднує функції підйому, переміщення та позиціонування вантажів у межах обмеженого робочого простору [1, 2]. На відміну від класичних підіймальних машин циклічної дії, таких як мостові чи козлові крани, маніпуляторним системам властива підвищена кінематична гнучкістю, багатоступеневою структурою та можливістю виконання складних просторових траєкторій руху вантажу. Саме ці особливості зумовлюють їх широке впровадження в умовах інтенсивної експлуатації, де ключовими вимогами є універсальність, точність і висока продуктивність.

Конструктивно вантажопідіймальне устаткування маніпуляторного типу являє собою просторову механічну систему, що складається з опорної бази, стріли або багатоланкової маніпуляційної системи, виконавчого захоплювального органу та привідних механізмів, переважно гідравлічного типу. Кожна з ланок маніпулятора виконує визначену функцію в загальній кінематичній схемі та сприймає навантаження, які змінюються як за величиною, так і за напрямком у процесі експлуатації. Наявність шарнірних з'єднань, гідроциліндрів, розподільчої апаратури та металоконструкцій зі змінною геометрією робить такі системи конструктивно складними та чутливими до умов навантаження [1, 2].

Сфери застосування вантажопідіймальних маніпуляторів охоплюють складську логістику, машинобудівні та складальні виробництва, металургійні та заготівельні цехи, транспортно-експедиційні комплекси, а також об'єкти з обмеженим доступом до стандартних підіймальних засобів. У складських умовах маніпулятори використовуються для навантаження й розвантаження

штучних і пакетованих вантажів (рис. 1.1), їх штабелювання та точного позиціонування на стелажних системах. У виробничому середовищі такі машини забезпечують подачу заготовок і деталей до верстатів, переміщення важких вузлів між технологічними позиціями та виконання допоміжних монтажних операцій.



Рисунок 1.1 – Використання маніпулятора Hiab Loglift 96S для навантаження й розвантаження штучних і пакетованих вантажів.

Особливістю експлуатації вантажопідіймального устаткування маніпуляторного типу є поєднання значних силових навантажень із високою частотою робочих циклів [3]. У багатьох випадках маніпулятори працюють у режимі близькому до граничного за вантажопідіймальністю, що супроводжується дією змінних і циклічних напружень у металоконструкціях, а також підвищеним навантаженням на елементи гідроприводу. За таких умов надійність устаткування визначається не лише міцністю окремих елементів, але й узгодженістю роботи всієї системи в цілому, включно з вузлами з'єднання, приводами та системами керування.

З інженерної точки зору вантажопідіймальні маніпулятори належать до класу машин підвищеної небезпеки, оскільки їх відмова може призвести не лише до економічних втрат, але й до аварійних ситуацій та загрози безпеці персоналу. Це зумовлює підвищені вимоги до їх проєктування, виготовлення та експлуатації, а також необхідність систематичного аналізу надійності впродовж усього життєвого циклу. Особливо актуальним є питання забезпечення надійності в умовах інтенсивної експлуатації, коли фактичні режими роботи значно перевищують середньостатистичні значення, закладені в нормативних розрахунках [4-6].

Таким чином, вантажопідіймальне устаткування маніпуляторного типу є складною багатокомпонентною технічною системою, що функціонує в умовах змінних навантажень і високої експлуатаційної інтенсивності. Широкі сфери його застосування зумовлюють необхідність поглибленого аналізу конструктивних особливостей, умов роботи та характерних відмов, що створює науково-технічну основу для подальшого розроблення інженерно-технічних заходів, спрямованих на підвищення надійності такого устаткування.

1.2 Умови інтенсивної експлуатації маніпуляторів у складських та виробничо-логістичних системах

Інтенсивна експлуатація вантажопідіймальних маніпуляторів у складських та виробничо-логістичних системах є характерною ознакою сучасних підприємств (рис. 1.2), що функціонують в умовах високої динаміки матеріальних потоків, обмеженого часу на виконання операцій та зростаючих вимог до продуктивності. На відміну від епізодичного або змінного режиму роботи, інтенсивна експлуатація передбачає багаторазове повторення робочих циклів упродовж зміни, що супроводжується значними змінними навантаженнями та підвищеним зносом елементів маніпуляторного устаткування.

Складські та виробничо-логістичні системи характеризуються специфічними умовами функціонування вантажопідіймального обладнання (табл. 1.1). До таких умов належить велика кількість операцій підйому й

переміщення вантажів із різною масою та габаритами, часті зміни траєкторій руху маніпулятора, а також необхідність точного позиціонування вантажу в обмеженому просторі. За цих обставин маніпуляторні системи працюють у режимі частих пусків і зупинок, що створює додаткові динамічні навантаження на металоконструкції та привідні механізми.

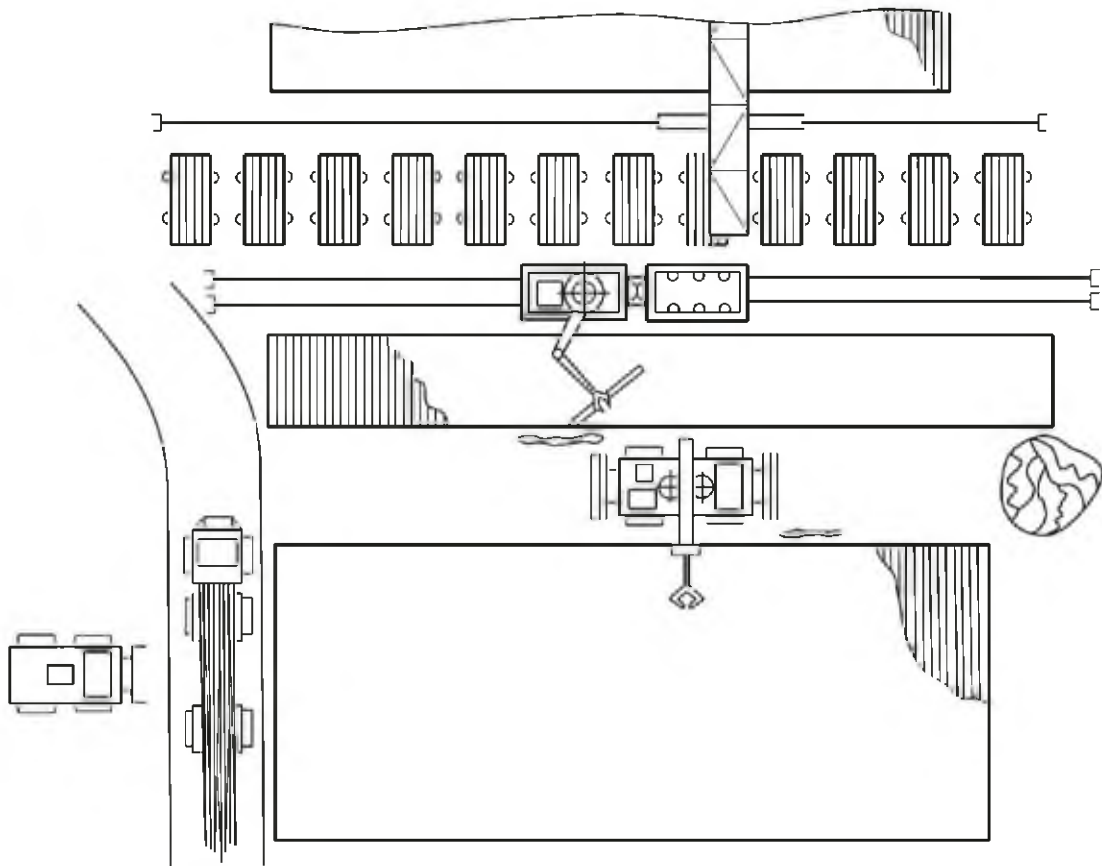


Рисунок 1.2 – Експлуатація вантажопідіймальних маніпуляторів у складських та виробничо-логістичних системах

Однією з визначальних характеристик інтенсивної експлуатації є високий коефіцієнт використання обладнання в часі. Маніпулятори часто залучаються до роботи протягом усієї зміни або навіть у багатозмінному режимі, що істотно зменшує час на відновлення та технічне обслуговування. За таких умов зростає ймовірність накопичення втомних пошкоджень у матеріалі конструктивних елементів, особливо в зонах концентрації напружень, таких як шарнірні з'єднання, вузли кріплення гідроциліндрів та переходи перерізів металоконструкції [1, 4].

Таблиця 1.1 – Характерні умови інтенсивної експлуатації вантажопідіймальних маніпуляторів у складських та виробничо-логістичних системах

Показник експлуатації	Характеристика умов	Потенційний вплив на надійність
Кількість робочих циклів за зміну	Висока, багаторазове повторення однотипних операцій	Накопичення втомних пошкоджень у металоконструкціях
Режим навантаження	Змінний, часто близький до граничного	Зростання напружень і ризику перевантаження
Частота пусків і зупинок	Підвищена	Додаткові динамічні та інерційні навантаження
Швидкість переміщення вантажу	Підвищена	Збільшення впливу інерційних сил
Точність позиціонування	Висока, в обмеженому просторі	Підвищене навантаження на шарнірні вузли
Тривалість безперервної роботи	Значна, часто багатозмінна	Зменшення ресурсу елементів і зростання зносу

Особливу роль у формуванні експлуатаційних навантажень відіграє нерівномірність маси вантажів та зміна їх положення відносно осі обертання маніпулятора [7, 8]. У складських умовах часто відсутня жорстка стандартизація вантажів, що призводить до варіації моментів сил, які діють на стрілу та інші елементи маніпулятора. Це, у свою чергу, зумовлює змінний характер напружено-деформованого стану та ускладнює прогнозування ресурсу елементів устаткування на основі спрощених розрахункових моделей.

Виробничо-логістичні системи також накладають підвищені вимоги до швидкодії маніпуляторів. Прагнення до скорочення тривалості операцій стимулює експлуатацію обладнання на підвищених швидкостях руху та з

прискореними циклами роботи (табл. 1.2). У таких режимах істотно зростає вплив інерційних сил, що призводить до додаткових навантажень на гідроприводи та системи керування. Динамічні ефекти, які виникають при різкому гальмуванні або зміні напрямку руху, можуть суттєво перевищувати статичні навантаження, що враховуються під час проектування [3, 4].

Таблиця 1.2 – Основні фактори інтенсивної експлуатації та їх вплив на елементи вантажопідіймального маніпулятора

Фактор інтенсивної експлуатації	Елементи, що зазнають впливу	Характер впливу
Змінна маса та положення вантажу	Стріла, опорні вузли, шарніри	Змінні згинальні та крутні моменти
Динамічні режими руху	Гідроциліндри, кріплення	Підвищені динамічні напруження
Часті цикли навантаження	Металоконструкції	Втома матеріалу
Агресивне виробниче середовище	Ущільнення, гідролінії	Прискорений знос і старіння
Інтенсивне керування оператором	Вся система в цілому	Перевищення розрахункових режимів
Обмежений час на обслуговування	Приводи, шарніри	Зростання ймовірності відмов

Важливим чинником інтенсивної експлуатації є також вплив навколишнього середовища. Складські та виробничі приміщення часто характеризуються наявністю пилу, підвищеної вологості, коливань температури та агресивних середовищ, які негативно впливають на стан гідравлічних рідин, ущільнень і поверхонь тертя. Такі умови прискорюють знос рухомих з'єднань і знижують надійність гідравлічних систем, що є критичним для безперебійної роботи маніпуляторів.

Не менш важливим аспектом є людський фактор, який проявляється у способах керування маніпуляторами, дотриманні регламентів експлуатації та

технічного обслуговування. В умовах інтенсивної роботи оператори часто змушені працювати в режимі підвищеного навантаження, що може призводити до відхилень від оптимальних режимів експлуатації, зокрема перевантаження маніпуляторів або виконання різких маневрів. Такі дії додатково збільшують навантаження на конструктивні елементи та скорочують їх ресурс.

Таким чином, умови інтенсивної експлуатації вантажопідіймальних маніпуляторів у складських та виробничо-логістичних системах формуються сукупністю технічних, технологічних та організаційних факторів. Висока циклічність роботи, змінність навантажень, динамічні режими руху та несприятливі умови середовища створюють передумови для прискореного зниження надійності устаткування. Це обґрунтовує необхідність подальшого детального аналізу характерних відмов і розроблення інженерно-технічних заходів, спрямованих на підвищення надійності вантажопідіймального устаткування маніпуляторного типу в умовах інтенсивної експлуатації.

1.3 Основні види відмов та пошкоджень елементів вантажопідіймального устаткування

Надійність вантажопідіймального устаткування маніпуляторного типу значною мірою визначається характером та інтенсивністю відмов окремих елементів, що входять до складу конструкції. В умовах інтенсивної експлуатації маніпулятори функціонують під дією змінних і часто нерівномірних навантажень, що призводить до поступового накопичення пошкоджень та зниження експлуатаційних показників. Аналіз основних видів відмов (табл. 1.3) є необхідною передумовою для обґрунтування інженерно-технічних заходів, спрямованих на підвищення надійності вантажопідіймального устаткування.

З точки зору теорії надійності, відмови вантажопідіймальних маніпуляторів можуть мати як раптовий (табл. 1.4), так і поступовий характер. Раптові відмови, як правило, пов'язані з перевищенням граничних навантажень або локальними дефектами матеріалу та з'єднань. Поступові відмови є

наслідком зносу, втоми матеріалу або деградації експлуатаційних властивостей елементів у процесі тривалої роботи (рис. 1.3). Для маніпуляторних систем, що працюють у складських і виробничо-логістичних умовах, домінуючими є саме поступові відмови, обумовлені циклічністю навантажень і несприятливими умовами середовища [7-11].

Таблиця 1.3 – Основні види відмов та пошкоджень елементів вантажопідіймального устаткування маніпуляторного типу

Елемент устаткування	Вид відмови або пошкодження	Основна причина виникнення	Наслідки для роботи маніпулятора
Металоконструкції стріли	Втомні тріщини, пластичні деформації	Циклічні змінні навантаження, концентрація напружень	Зниження несучої здатності, аварійні ситуації
Шарнірні з'єднання	Зношування, збільшення люфтів	Недостатнє змащування, високі динамічні навантаження	Порушення кінематики, зростання динамічних навантажень
Гідроциліндри	Витік робочої рідини, втрата герметичності	Знос ущільнень, забруднення рідини	Зниження плавності руху, втрата керованості
Гідролінії	Розриви, витоки	Пульсації тиску, старіння матеріалів	Різке падіння тиску, зупинка обладнання
Захоплювальні пристрої	Механічне пошкодження, деформації	Перевантаження, неправильне позиціонування вантажу	Небезпека зриву вантажу
Система керування	Збої, відмова датчиків	Вібрації, вплив середовища	Простої, зниження надійності системи

Однією з найбільш поширених груп пошкоджень є ушкодження металоконструкцій маніпулятора. До них належать втомні тріщини в елементах стріли, деформації балкових конструкцій, порушення геометрії вузлів та локальні пластичні деформації в зонах концентрації напружень. Особливо вразливими є місця переходу перерізів, зварні шви та зони кріплення гідроциліндрів, де поєднується дія згинальних і крутних моментів. Накопичення

втомних пошкоджень у цих зонах може тривалий час залишатися непоміченим, однак у певний момент призводить до різкого зниження несучої здатності конструкції.

Таблиця 1.4 – Класифікація відмов вантажопідіймального устаткування за характером та наслідками

Ознака класифікації	Тип відмови	Характеристика
За характером розвитку	Раптова	Виникає без попередніх ознак, часто пов'язана з перевантаженням
	Поступова	Розвивається внаслідок зносу та втоми матеріалу
За тривалістю	Повна	Устаткування повністю втрачає працездатність
	Часткова	Погіршення окремих функцій без повної зупинки
За впливом на безпеку	Критична	Створює загрозу аварії та травматизму
	Некритична	Призводить до зниження продуктивності
За можливістю відновлення	Усувна	Ліквідується технічним обслуговуванням
	Неусувна	Потребує заміни елементів або капітального ремонту

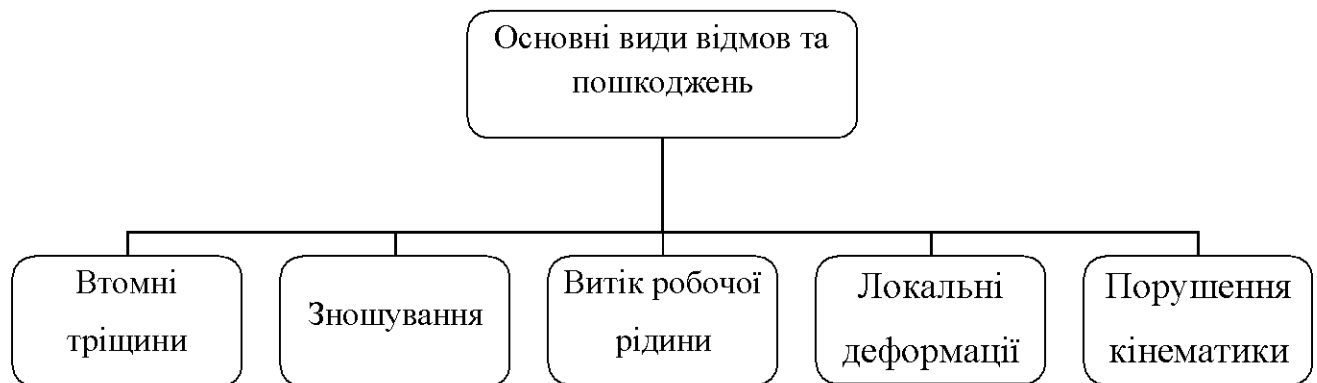


Рисунок 1.3 – Основні види відмов та пошкоджень елементів вантажопідіймального устаткування

Шарнірні з'єднання маніпуляторів також належать до елементів з підвищеним ризиком відмов. У процесі експлуатації вони зазнають зношування робочих поверхонь, збільшення люфтів та порушення співвісності. Такі дефекти негативно впливають на кінематичну точність маніпулятора, спричиняють нерівномірний розподіл навантажень між ланками та створюють додаткові динамічні навантаження. За відсутності своєчасного технічного обслуговування зношування шарнірів може призвести до заклинювання або руйнування з'єднань, що є критичним з погляду безпеки експлуатації.

Суттєву частку відмов у вантажопідіймальному устаткованні маніпуляторного типу становлять несправності гідравлічних систем. До найбільш характерних належать витіки робочої рідини через ущільнення, зниження тиску в гідролініях, нестабільна робота гідроциліндрів та відмови розподільчої апаратури. Причинами таких відмов є як знос ущільнювальних елементів, так і забруднення робочої рідини, коливання температури та порушення регламентів обслуговування. Деградація гідроприводу безпосередньо впливає на плавність руху маніпулятора, точність позиціонування вантажу та загальну безпечність виконання операцій.

Окрему групу становлять відмови елементів системи керування та допоміжних механізмів. У складських і виробничо-логістичних системах маніпулятори часто оснащуються електрогідравлічними або електронними системами керування, чутливими до зовнішніх впливів. Вібραції, запиленість, вологість і температурні коливання можуть спричинити порушення контактів, збої в роботі датчиків і відмови виконавчих пристроїв. Хоча такі відмови не завжди призводять до безпосереднього руйнування конструктивних елементів, вони істотно знижують надійність устаткування в цілому та збільшують тривалість простоїв.

Системний аналіз показує, що більшість відмов вантажопідіймальних маніпуляторів мають комплексний характер і є наслідком взаємодії кількох негативних факторів (див. табл. 1.4). Наприклад, збільшення люфтів у шарнірних з'єднаннях призводить до зростання динамічних навантажень на металоконструкції, що, у свою чергу, прискорює розвиток втомних тріщин. Аналогічно, зниження ефективності гідроприводу може спричинити

нерівномірні режими навантаження та додаткові напруження в конструктивних елементах.

З'ясовано, що основні види відмов та пошкоджень елементів вантажопідіймального устаткування маніпуляторного типу пов'язані з втомою металоконструкцій, зношуванням шарнірних з'єднань, деградацією гідравлічних систем і відмовами систем керування. Виявлення закономірностей виникнення таких відмов та аналіз причин їх розвитку створюють науково-інженерну основу для подальшого обґрунтування та розроблення ефективних інженерно-технічних заходів щодо підвищення надійності вантажопідіймального устаткування в умовах інтенсивної експлуатації.

1.4 Аналіз факторів, що впливають на надійність металоконструкцій, гідроприводів і вузлів з'єднання

Надійність вантажопідіймального устаткування маніпуляторного типу формується під впливом сукупності взаємопов'язаних факторів, що діють на різних рівнях функціонування технічної системи. Умови інтенсивної експлуатації, характерні для складських і виробничо-логістичних систем, зумовлюють підвищені вимоги до міцності, довговічності та стабільності параметрів металоконструкцій, гідроприводів і вузлів з'єднання. Аналіз цих факторів є необхідним для встановлення причинно-наслідкових зв'язків між режимами роботи устаткування та виникненням відмов, а також для подальшого обґрунтування інженерно-технічних заходів щодо підвищення надійності.

Металоконструкції маніпуляторів (рис. 1.4) зазнають дії змінних статичних і динамічних навантажень, які визначають напружено-деформований стан елементів упродовж робочого циклу. Вирішальним фактором зниження їх надійності є циклічність навантаження, що спричиняє розвиток втомних

процесів у матеріалі (табл. 1.5). Часті зміни напрямку дії сил, коливання величини згинальних і крутних моментів, а також наявність зон концентрації напружень у місцях зварних з'єднань і переходів перерізів прискорюють накопичення мікропошкоджень. Додатковим негативним чинником виступають залишкові напруження, що виникають у процесі виготовлення металоконструкції і можуть знижувати ефективний запас міцності.

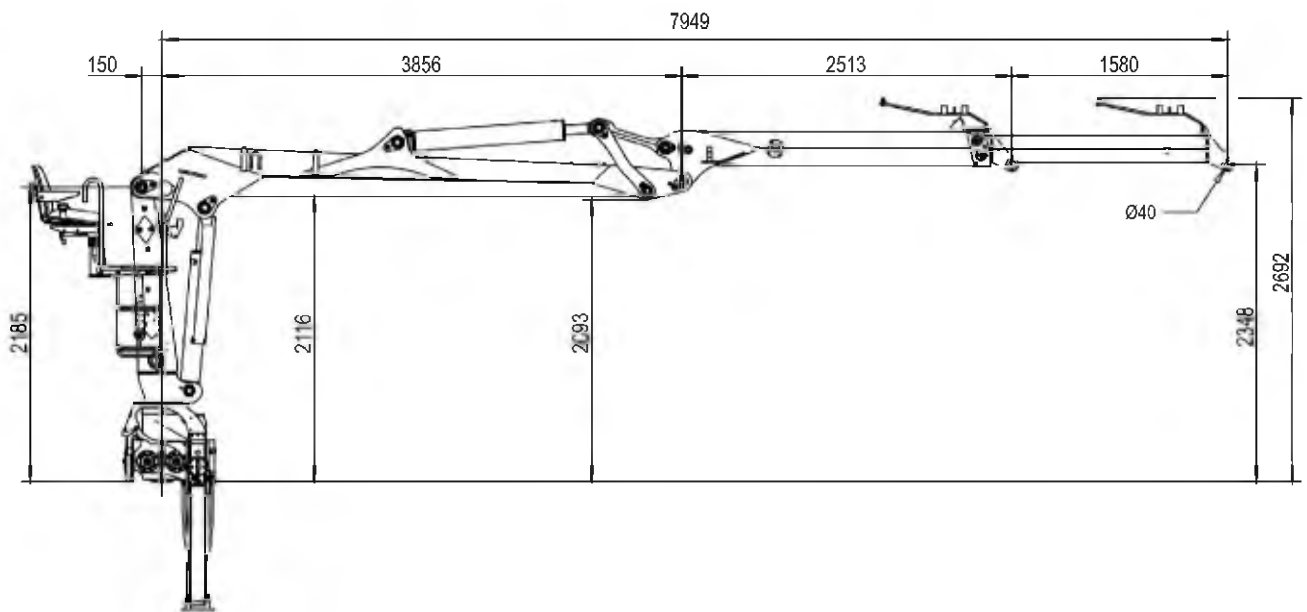


Рисунок 1.4 – Гідравлічний маніпулятор Loglift 83

Суттєвий вплив на надійність металоконструкцій має також якість матеріалів і технологія їх оброблення. Невідповідність механічних властивостей сталі розрахунковим значенням, наявність структурних неоднорідностей або дефектів зварних швів створюють передумови для локального перевантаження окремих ділянок. В умовах інтенсивної експлуатації такі дефекти проявляються швидше, оскільки реальні навантаження часто перевищують номінальні значення, закладені під час проектування. Таким чином, надійність металоконструкції визначається не лише рівнем зовнішніх навантажень, але й технологічною досконалістю їх виготовлення [10-12].

Таблиця 1.5 – Основні фактори, що впливають на надійність металоконструкцій вантажопідіймальних маніпуляторів

Група факторів	Конкретний фактор	Характер впливу на металоконструкцію	Потенційні наслідки
Експлуатаційні	Циклічні змінні навантаження	Накопичення втомних пошкоджень	Утворення та розвиток втомних тріщин
	Динамічні режими руху	Підвищення амплітуди напружень	Зменшення довговічності
Конструктивні	Концентрація напружень	Локальне перевантаження матеріалу	Передчасне руйнування
	Геометрична неоднорідність перерізів	Нерівномірний розподіл напружень	Локальні деформації
Технологічні	Якість зварних швів	Наявність дефектів і залишкових напружень	Ініціювання тріщин
	Властивості матеріалу	Невідповідність розрахунковим характеристикам	Зниження запасу міцності
Організаційні	Недостатній контроль стану	Несвоєчасне виявлення пошкоджень	Аварійні відмови

Гідроприводи вантажопідіймальних маніпуляторів є одним із найбільш відповідальних функціональних елементів, оскільки вони забезпечують передавання зусиль і реалізацію заданих траєкторій руху. На їх надійність істотно впливають параметри робочого середовища, зокрема тиск, температура та чистота гідравлічної рідини (табл. 1.6). Пульсації тиску, характерні для інтенсивних режимів роботи, спричиняють додаткові навантаження на

гідроциліндри, ущільнення та гідролінії. Тривала робота в умовах підвищених температур призводить до старіння ущільнювальних матеріалів і погіршення герметичності системи.

Таблиця 1.6 – Фактори впливу на надійність гідроприводів і вузлів з'єднання маніпуляторного устаткування

Елемент системи	Фактор впливу	Механізм зниження надійності	Характерні наслідки
Гідроприводи	Пульсації тиску	Перевантаження гідроциліндрів і ущільнень	Витоки, зниження ефективності
	Підвищена температура	Старіння робочої рідини та ущільнень	Порушення герметичності
	Забруднення рідини	Абразивний знос робочих поверхонь	Відмови гідроапаратури
Шарнірні з'єднання	Недостатнє змащування	Зростання коефіцієнта тертя	Прискорене зношування
	Високі контактні напруження	Пластична деформація контактних зон	Збільшення люфтів
Кріпильні елементи	Вібраційні навантаження	Послаблення з'єднань	Порушення жорсткості конструкції
Обслуговування	Порушення регламентів	Прискорена деградація елементів	Зростання ймовірності відмов

Не менш важливим фактором є забруднення гідравлічної рідини твердими частинками або продуктами зношування. Навіть незначна концентрація домішок може спричинити абразивний знос робочих поверхонь гідроциліндрів і розподільчої апаратури, що знижує точність керування та підвищує ймовірність

відмов. За умов інтенсивної експлуатації ризик забруднення зростає через скорочення інтервалів між технічними обслуговуваннями та підвищене навантаження на систему фільтрації.

Вузли з'єднання, зокрема шарнірні пари та кріпильні елементи, відіграють ключову роль у забезпеченні цілісності та працездатності маніпуляторного устаткування. Їх надійність визначається характером контактної взаємодії поверхонь, рівнем контактних напружень і умовами змащування. В умовах високої циклічності навантажень зношування шарнірів супроводжується збільшенням люфтів, що призводить до порушення кінематичної схеми та нерівномірного розподілу навантажень між елементами конструкції. Це, у свою чергу, підсилює динамічні навантаження та негативно впливає на довговічність металоконструкцій і гідроприводів.

Вагомим чинником, що впливає на надійність вузлів з'єднання, є якість технічного обслуговування та експлуатаційна дисципліна. Недостатнє змащування, несвоєчасна підтяжка кріпильних елементів або ігнорування регламентів контролю стану вузлів прискорюють процеси деградації. За інтенсивної експлуатації навіть незначні відхилення від рекомендованих умов обслуговування можуть призводити до різкого скорочення ресурсу окремих елементів.

Узагальнюючи проведений аналіз, можна стверджувати, що надійність металоконструкцій, гідроприводів і вузлів з'єднання вантажопідіймального устаткування маніпуляторного типу визначається комплексною дією експлуатаційних, конструктивних, технологічних та організаційних факторів. Виявлення домінуючих чинників зниження надійності та встановлення їх взаємозв'язків є необхідною передумовою для формування науково обґрунтованих інженерно-технічних заходів, спрямованих на підвищення надійності устаткування в умовах інтенсивної експлуатації.

1.5 Нормативні вимоги та критерії оцінювання надійності вантажопідіймального устаткування

Нормативне забезпечення проектування, експлуатації та оцінювання надійності вантажопідіймального устаткування є фундаментальною складовою системи технічної безпеки й ефективного функціонування машин маніпуляторного типу (табл. 1.7). В умовах інтенсивної експлуатації саме дотримання нормативних вимог дозволяє обмежити ризик відмов, мінімізувати аварійні ситуації та забезпечити прогнозований ресурс роботи обладнання. Тому аналіз чинних нормативів і критеріїв оцінювання надійності є необхідним етапом формування науково обґрунтованих інженерно-технічних заходів.

Нормативні вимоги до вантажопідіймального устаткування маніпуляторного типу регламентують як етапи проектування і виготовлення, так і умови експлуатації та технічного обслуговування [3, 4, 9]. У цих документах визначаються допустимі навантаження, коефіцієнти запасу міцності, вимоги до матеріалів і зварних з'єднань, а також правила контролю технічного стану обладнання. Особлива увага приділяється обмеженню напружень у металоконструкціях, забезпеченню стійкості та запобіганню втомному руйнуванню, що є критично важливим для маніпуляторів, які працюють у режимах багаторазових циклів навантаження.

Таблиця 1.7 – Нормативні вимоги та критерії оцінювання надійності вантажопідіймального устаткування маніпуляторного типу

Напрямок нормативного регулювання	Основні вимоги	Критерії оцінювання надійності	Інженерне значення
1	2	3	4
Металоконструкції	Обмеження напружень, забезпечення запасу міцності, перевірка стійкості	Допустимі напруження, граничні деформації	Запобігання втраті несучої здатності

Продовження табл. 1.7

Втомна міцність	Урахування циклічних навантажень, перевірка довговічності	Ресурс до граничного стану, кількість циклів	Прогнозування терміну експлуатації
Гідроприводи	Допустимий робочий тиск, температурний режим, чистота рідини	Стабільність параметрів, герметичність	Забезпечення керованості та плавності руху
Вузли з'єднання	Обмеження контактних напружень, змащування	Допустимі люфти, знос	Збереження кінематичної точності
Динамічні навантаження	Урахування інерційних сил і ударних ефектів	Коефіцієнти динамічності	Запобігання перевантаженню елементів
Граничні стани	Розмежування першого і другого граничних станів	Критичний та експлуатаційний стан	Планування ремонтів і модернізації
Експлуатація та контроль	Регламентовані огляди та обслуговування	Імовірність безвідмовної роботи, коефіцієнт готовності	Підтримання заданого рівня надійності

Нормативні документи передбачають, що розрахунок металоконструкцій вантажопідіймального устаткування має здійснюватися з урахуванням найнебезпечніших поєднань навантажень, включно зі статичними, динамічними

та інерційними складовими. При цьому встановлюються гранично допустимі значення напружень, які не повинні перевищувати частку від розрахункової міцності матеріалу з урахуванням коефіцієнтів умов роботи. Для елементів, що зазнають циклічного навантаження, додатково вводяться вимоги щодо перевірки втомної міцності та довговічності.

Важливим аспектом нормативного регулювання є оцінювання надійності гідроприводів і гідравлічних систем. Нормативи визначають допустимі робочі тиски, температурні режими та вимоги до чистоти робочої рідини, а також регламентують періодичність контролю герметичності та стану ущільнювальних елементів. Недотримання цих вимог призводить до прискореного зносу компонентів гідроприводу та зниження загальної надійності маніпуляторного устаткування.

Критерії оцінювання надійності вантажопідіймального устаткування формуються на основі показників теорії надійності машин і механізмів. До базових критеріїв належать імовірність безвідмовної роботи протягом заданого часу або кількості циклів, середній напрацювання до відмови, ресурс до граничного стану та коефіцієнт готовності. Для маніпуляторів, що працюють в умовах інтенсивної експлуатації, особливого значення набувають показники, пов'язані з втомною довговічністю та стабільністю параметрів упродовж тривалого часу.

Нормативний підхід до оцінювання надійності передбачає також розмежування граничних станів устаткування. Перший граничний стан пов'язаний із втратою несучої здатності або стійкості конструкції, що є неприпустимим з точки зору безпеки. Другий граничний стан визначається перевищенням допустимих деформацій, зниженням точності позиціонування або порушенням функціональних характеристик, які ще не призводять до аварії, але обмежують подальшу експлуатацію. Таке розмежування дозволяє більш гнучко підходити до оцінювання ресурсу та планування ремонтних заходів.

Оцінювання відповідності вантажопідіймального устаткування нормативним вимогам здійснюється шляхом розрахункових перевірок,

експериментальних випробувань і періодичних технічних оглядів. У сучасних умовах дедалі більшого значення набуває застосування розрахунково-аналітичних методів і комп'ютерного моделювання, які дозволяють враховувати складні режими навантаження та прогнозувати розвиток пошкоджень на ранніх стадіях. Поєднання нормативних критеріїв з результатами інженерних розрахунків створює основу для об'єктивної оцінки надійності маніпуляторного устаткування.

Таким чином, нормативні вимоги та критерії оцінювання надійності вантажопідіймального устаткування визначають допустимі межі напружень, деформацій і експлуатаційних параметрів, а також формують систему показників, за якими оцінюється працездатність і безпечність маніпуляторів. Їх урахування є необхідною умовою для подальшого розроблення інженерно-технічних заходів, спрямованих на підвищення надійності вантажопідіймального устаткування в умовах інтенсивної експлуатації та переходу до розрахункових моделей і залежностей, що будуть розглянуті в наступних розділах роботи.

1.6 Постановка науково-технічної задачі підвищення надійності маніпуляторів в умовах інтенсивної експлуатації

Проведений аналіз умов експлуатації вантажопідіймального устаткування маніпуляторного типу, характерних видів відмов, а також факторів, що впливають на надійність металоконструкцій, гідроприводів і вузлів з'єднання, свідчить про складний багатofакторний характер процесів деградації таких технічних систем. В умовах інтенсивної експлуатації маніпулятори функціонують за режимів, які часто наближаються до граничних або перевищують номінальні значення, закладені під час проектування. Це зумовлює прискорене накопичення втомних пошкоджень, зростання зносу та підвищену ймовірність відмов.

Сучасні нормативні підходи до оцінювання надійності

вантажопідіймального устаткування переважно базуються на узагальнених коефіцієнтах запасу та спрощених розрахункових моделях, які не завжди повною мірою враховують реальні умови інтенсивної експлуатації. Унаслідок цього між фактичними експлуатаційними навантаженнями та прийнятими розрахунковими параметрами виникає розбіжність, що негативно впливає на точність прогнозування ресурсу та безвідмовності роботи маніпуляторів.

Науково-технічна проблема, яка постає в цьому контексті, полягає в необхідності розроблення таких інженерно-технічних заходів, які б забезпечували підвищення надійності вантажопідіймального устаткування маніпуляторного типу з урахуванням реальних режимів інтенсивної експлуатації. Це вимагає переходу від описового аналізу умов роботи до формалізованого розрахункового підходу, що дозволяє кількісно оцінювати вплив навантажень, геометричних параметрів і експлуатаційних факторів на показники надійності.

У зв'язку з цим науково-технічну задачу підвищення надійності маніпуляторів доцільно сформулювати як задачу визначення закономірностей зміни напружено-деформованого стану, втомної довговічності та експлуатаційних показників елементів вантажопідіймального устаткування залежно від інтенсивності навантаження та режимів роботи. Особливу увагу необхідно приділити критичним елементам конструкції, для яких характерна концентрація напружень і підвищена частота відмов, зокрема металоконструкціям стріли, шарнірним з'єднанням і елементам гідроприводу.

Формалізація науково-технічної задачі передбачає встановлення зв'язку між зовнішніми експлуатаційними параметрами (маса вантажу, радіус вильоту, швидкість руху, кількість робочих циклів) та внутрішніми параметрами системи (напруження, деформації, контактні навантаження, знос). На основі цього зв'язку виникає можливість отримання аналітичних і розрахункових залежностей, які дозволяють прогнозувати ресурс елементів маніпулятора та обґрунтовувати доцільність тих чи інших інженерно-технічних рішень.

Таким чином, науково-технічна задача даної магістерської роботи полягає

у розробленні та обґрунтуванні комплексу інженерно-технічних заходів щодо підвищення надійності вантажопідіймального устаткування маніпуляторного типу шляхом розрахункового аналізу напружено-деформованого стану, оцінювання довговічності та врахування реальних умов інтенсивної експлуатації. Розв'язання цієї задачі створює основу для подальшого теоретичного та розрахункового дослідження, яке буде виконано у наступному розділі роботи.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА РОЗРАХУНКОВІ МОДЕЛІ ОЦІНЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ ВАНТАЖОПІДІЙМАЛЬНИХ МАНІПУЛЯТОРІВ

Формування теоретичної та розрахункової бази оцінювання надійності вантажопідіймальних маніпуляторів, що експлуатуються в інтенсивних режимах, ґрунтується на встановленні кількісних зав'язків між експлуатаційними навантаженнями, напружено-деформованим станом елементів конструкції та показниками надійності, які характеризують безвідмовність і довговічність обладнання. Такий підхід забезпечує можливість переходу від якісного аналізу умов роботи до кількісного прогнозування ресурсу і працездатності маніпуляторного устаткування.

Реалізація зазначеного підходу передбачає поєднання положень теорії надійності машин і механізмів з аналітичними моделями механіки деформівного тіла, кінематики та силового аналізу. Увага зосереджується на формуванні розрахункових схем, адекватних реальним умовам експлуатації, визначенні навантажувальних режимів і циклічного характеру дії сил, а також на аналітичному визначенні напружено-деформованого стану, оцінюванні втомної міцності металоконструкцій і розрахунку показників надійності гідравлічних елементів. Узагальнення отриманих результатів у вигляді функціональних залежностей створює основу для прогнозування зміни надійності маніпуляторів залежно від інтенсивності експлуатації та слугує підґрунтям для розроблення інженерно-технічних заходів, реалізованих у наступному розділі.

2.1 Програма та методика розрахункового дослідження надійності вантажопідіймальних маніпуляторів

Програма та методика розрахункового дослідження надійності вантажопідіймальних маніпуляторів сформовані з урахуванням багатофакторного характеру їх роботи та необхідності кількісного

обґрунтування інженерно-технічних рішень. Основною метою методики є встановлення закономірностей впливу експлуатаційних навантажень і режимів роботи на напружено-деформований стан елементів маніпулятора, а також на показники безвідмовності й довговічності.

Методика дослідження базується на поєднанні аналітичних методів механіки, положень теорії надійності та розрахунково-аналітичних підходів опору матеріалів. На першому етапі здійснюється ідентифікація об'єкта дослідження та визначення його структурних елементів, які мають вирішальний вплив на загальну надійність. До таких елементів віднесено металоконструкції стріли та опорних вузлів, шарнірні з'єднання, а також основні елементи гідроприводу.

Другий етап передбачає формування розрахункових схем вантажопідіймального маніпулятора з урахуванням реальних умов експлуатації. На цьому етапі встановлюються характерні навантажувальні випадки, визначаються діючі сили та моменти, а також задаються граничні та робочі режими функціонування. Особлива увага приділяється циклічному характеру навантажень, який є визначальним чинником розвитку втомних пошкоджень і зниження надійності.

Третій етап методики пов'язаний з аналітичним визначенням напружено-деформованого стану основних елементів маніпулятора. Для цього використовуються класичні положення опору матеріалів і теорії пружності, що дозволяють отримати вирази для напружень і деформацій у характерних перерізах конструкції. Отримані результати слугують вихідними даними для подальшого оцінювання втомної міцності та довговічності металоконструкцій.

На четвертому етапі виконується оцінювання показників надійності, які характеризують безвідмовність і ресурс вантажопідіймального маніпулятора. Для металоконструкцій основну увагу зосереджено на визначенні довговічності за умов циклічного навантаження, тоді як для гідравлічних елементів розглядаються показники імовірності безвідмовної роботи та середнього напрацювання до відмови. У межах цього етапу застосовуються узагальнені

моделі деградації, адаптовані до умов інтенсивної експлуатації.

Заключний етап програми дослідження полягає в узагальненні результатів і отриманні функціональних залежностей між експлуатаційними параметрами, напруженнями та показниками надійності. Такі залежності створюють основу для порівняльного аналізу різних варіантів конструктивних і технологічних рішень, а також для обґрунтування інженерно-технічних заходів, спрямованих на підвищення надійності вантажопідіймального устаткування.

Запропонована програма та методика розрахункового дослідження забезпечують системний підхід до оцінювання надійності вантажопідіймальних маніпуляторів і дозволяють перейти від якісного аналізу умов експлуатації до кількісного обґрунтування рішень, що буде реалізовано в наступних підрозділах розділу.

2.2 Теоретичні положення теорії надійності машин і механізмів

Теорія надійності машин і механізмів є науковою основою для кількісного оцінювання працездатності технічних систем у процесі експлуатації. Для вантажопідіймальних маніпуляторів, що функціонують в умовах інтенсивної та циклічної роботи, положення теорії надійності набувають особливого значення, оскільки дозволяють пов'язати механічні навантаження, деградаційні процеси та ймовірнісні характеристики відмов у єдину розрахункову модель.

Надійність машини розглядається як її властивість зберігати у часі здатність виконувати задані функції в установлених межах параметрів і умов експлуатації. Кількісно ця властивість описується системою показників, серед яких базовим є ймовірність безвідмовної роботи. Для випадку, коли відмова розглядається як випадкова подія, ймовірність безвідмовної роботи протягом часу t або напрацювання N визначається залежністю

$$P(t) = \frac{N_{\text{без}}(t)}{N_{\text{зар}}}, \quad (2.1)$$

де $N_{\text{без}}(t)$ – кількість об'єктів, що не відмовили за час t

$N_{\text{заг}}$ – загальна кількість об'єктів, що перебували під спостереженням.

Для технічних систем, до яких належать вантажопідіймальні маніпулятори, важливим показником є інтенсивність відмов, яка характеризує швидкість настання відмов у часі. Вона визначається як

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}, \quad (2.2)$$

де $f(t)$ – щільність розподілу часу до відмови.

Інтенсивність відмов дозволяє аналізувати стадії «прироботки», нормальної експлуатації та зносу, що є типовими для машин з тривалим терміном служби.

У практиці інженерних розрахунків часто застосовується припущення про постійну інтенсивність відмов на ділянці нормальної експлуатації. У цьому випадку ймовірність безвідмовної роботи описується експоненціальним законом

$$P(t) = \exp(-\lambda t), \quad (2.3)$$

Зазначена модель є прийнятною для гідравлічних і допоміжних елементів маніпуляторів, відмови яких мають переважно випадковий характер.

Для механічних елементів, зокрема металоконструкцій маніпуляторів, визначальним є ресурс до граничного стану, який зазвичай обмежується втомною міцністю. У цьому випадку надійність доцільно оцінювати через імовірність того, що напрацювання N не перевищить граничне значення $N_{\text{гр}}$. Узагальнено це можна подати як

$$P(N) = P(N < N_{\text{гр}}) \quad (2.4)$$

Одним з інтегральних показників надійності є середній напрацювання до відмови, який визначається математичним сподіванням часу або кількості

циклів до настання відмови

$$T_{\text{cp}} = \int_0^{\infty} P(t) dt \quad (2.5)$$

Для елементів маніпуляторів, що працюють у циклічному режимі, доцільно розглядати середній ресурс у циклах, що безпосередньо пов'язує теорію надійності з розрахунками втомної довговічності.

Важливою особливістю вантажопідіймальних маніпуляторів є їх ієрархічна структура, у якій загальна надійність системи залежить від надійності окремих елементів. Для послідовного з'єднання елементів, що є характерним для маніпуляторних систем, імовірність безвідмовної роботи визначається як добуток імовірностей безвідмовної роботи окремих складників

$$P_{\text{сист}} = \prod_{i=1}^n P_i \quad (2.6)$$

Це положення підкреслює критичну роль елементів з найменшим ресурсом, які визначають надійність маніпулятора в цілому.

З'ясовано, що теоретичні положення теорії надійності створюють математичну основу для кількісного оцінювання працездатності вантажопідіймальних маніпуляторів. Введені показники та залежності дозволяють у подальших підрозділах поєднати результати механічних розрахунків напружень і деформацій з оцінюванням довговічності та безвідмовності, що є необхідним для обґрунтування інженерно-технічних заходів щодо підвищення надійності в умовах інтенсивної експлуатації.

2.3 Кінематичні та силові особливості роботи вантажопідіймальних маніпуляторів

Вантажопідіймальні маніпулятори належать до класу просторових багатоланкових механічних систем, у яких рух виконавчого органу реалізується

за рахунок узгодженої роботи кількох кінематично пов'язаних ланок (рис. 2.1 і 2.2). Особливістю таких систем є поєднання складної кінематики з дією значних силових навантажень, величина і напрям яких істотно змінюються в процесі робочого циклу. Саме ця обставина визначає специфіку напружено-деформованого стану елементів маніпулятора та безпосередньо впливає на його надійність.

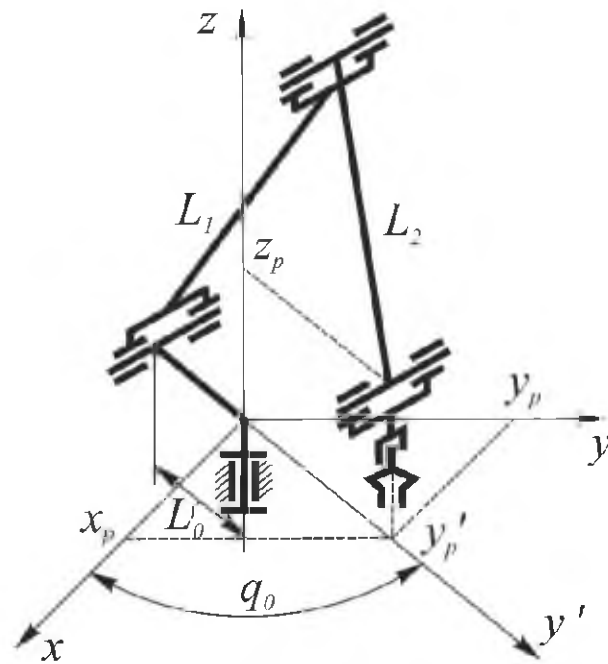


Рисунок 2.1 – Кінематична схеми шарнірного маніпуляторів

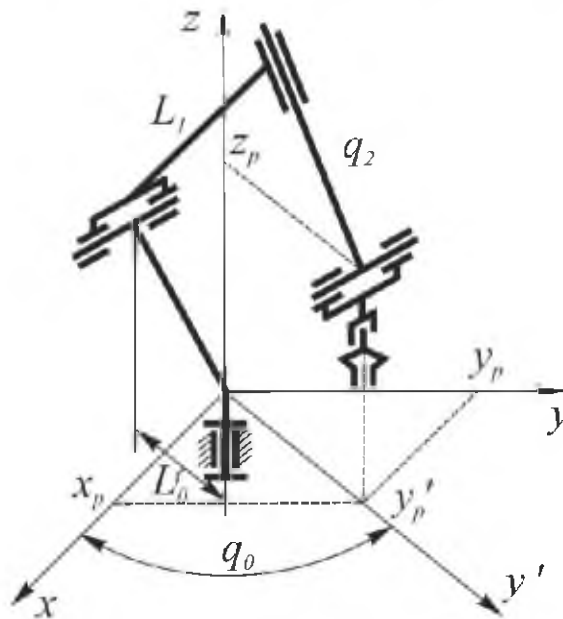


Рисунок 2.2 – Кінематична схеми шарнірно-телескопічного маніпуляторів

Кінематично маніпулятор може бути поданий у вигляді послідовного ланцюга жорстких ланок, з'єднаних обертальними або поступальними шарнірами. Положення кожної ланки визначається узагальненими координатами, як правило кутами повороту або лінійними переміщеннями, що задаються роботою гідроциліндрів. У загальному випадку положення захоплювального органу в просторі є функцією узагальнених координат

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(q_1, q_2, q_3, \dots, q_n), \quad (2.7)$$

де q_n – узагальнені координати, що характеризують стан окремих ланок маніпулятора.

Зміна положення ланок у часі зумовлює появу швидкостей і прискорень, які формують інерційні навантаження. Лінійні швидкості та прискорення окремих точок конструкції визначаються похідними узагальнених координат за часом, що в умовах інтенсивної експлуатації може призводити до значних динамічних ефектів. Особливо небезпечними з точки зору надійності є режими різкого гальмування або зміни напрямку руху, коли інерційні сили накладаються на статичні навантаження від маси вантажу.

Силовий аналіз вантажопідіймального маніпулятора базується на розгляді рівноваги або руху окремих ланок під дією зовнішніх і внутрішніх сил. До основних сил, що діють на конструкцію, належать сила ваги вантажу, власна вага елементів маніпулятора, зусилля гідроциліндрів, а також інерційні сили. Для статичного або квазістатичного режиму роботи умови рівноваги можуть бути записані у вигляді

$$\sum \mathbf{F} = 0, \quad \sum \mathbf{M} = 0, \quad (2.8)$$

де \mathbf{F} – сили, що діють на ланку;

\mathbf{M} – моменти сил відносно вибраної точки або осі.

Однією з характерних особливостей маніпуляторів є значна залежність силових навантажень від геометричного положення стріли. При збільшенні радіуса вильоту вантажу зростає згинальний момент у небезпечних перерізах металоконструкції, який може бути поданий у вигляді

$$M = Q \cdot l \quad (2.9)$$

де Q – сила ваги вантажу з урахуванням динамічної складової,

l – горизонтальна відстань від осі обертання до точки прикладання сили.

У реальних умовах експлуатації навантаження мають змінний характер, тому доцільно враховувати коефіцієнт динамічності, який дозволяє привести змінні та ударні навантаження до еквівалентних статичних. У такому випадку розрахункове навантаження може бути подано як

$$Q_p = \varphi_d \cdot Q \quad (2.10)$$

де φ_d – коефіцієнт динамічності.

Силкові зусилля в гідроциліндрах, що приводять у рух ланки маніпулятора, визначаються умовами рівноваги та передатними відношеннями кінематичної схеми. У загальному вигляді зусилля в гідроциліндрі може бути оцінене як

$$F_c = \frac{M}{a} \quad (2.11)$$

де a – плече прикладання зусилля гідроциліндра відносно осі обертання відповідної ланки.

Отже, кінематичні та силкові особливості роботи вантажопідіймальних маніпуляторів визначають складний характер навантаження їх елементів, який змінюється залежно від положення ланок, маси вантажу та режиму руху. Отримані кінематичні співвідношення і силкові залежності є вихідною базою для формування розрахункових схем, аналізу навантажувальних режимів і подальшого аналітичного визначення напружено-деформованого стану, що буде розглянуто в наступних підрозділах.

2.4 Формування розрахункових схем маніпуляторного устаткування

Формування розрахункових схем є ключовим етапом теоретичного та розрахункового дослідження надійності вантажопідіймальних маніпуляторів,

оскільки саме на цьому етапі здійснюється перехід від реальної конструкції до ідеалізованої механічної моделі, придатної для аналітичного аналізу. Коректність побудови розрахункових схем визначає точність подальших розрахунків напружено-деформованого стану, довговічності та показників надійності.

Реальне маніпуляторне устаткування характеризується складною просторовою геометрією, наявністю багатьох з'єднань, змінною жорсткістю та неоднорідністю матеріалів. З метою спрощення аналізу ці особливості замінюються узагальненими елементами розрахункової схеми, що відтворюють основні силові та кінематичні властивості конструкції. При цьому маніпулятор подається у вигляді системи жорстких або пружно-деформівних ланок, з'єднаних ідеалізованими шарнірами.

Основними принципами формування розрахункових схем є збереження статичної та кінематичної еквівалентності реальної конструкції, а також коректне відтворення умов закріплення і навантаження. Для кожної ланки маніпулятора визначаються характерні перерізи, у яких очікується максимальний рівень напружень, зокрема зони кріплення гідроциліндрів, переходи перерізів та області зварних з'єднань. Саме ці перерізи надалі використовуються для оцінювання міцності та довговічності.

У межах розрахункової схеми зовнішні навантаження зводяться до еквівалентних сил і моментів, прикладених у характерних точках конструкції. Для статичних і квазістатичних режимів роботи навантаження від вантажу та власної ваги елементів маніпулятора можуть бути подані у вигляді зосереджених сил, тоді як розподілені навантаження застосовуються для опису дії власної маси довгомірних елементів. Узагальнено зовнішні навантаження можуть бути записані як

$$\mathbf{F}_{\text{зовн}} = \sum_i \mathbf{F}_i, \quad \mathbf{M}_{\text{зовн}} = \sum_i \mathbf{M}_i \quad (2.12)$$

Важливим етапом формування розрахункової схеми є задання граничних умов, які визначають характер взаємодії маніпулятора з опорною основою.

Опорні вузли, як правило, моделюються у вигляді жорстких або пружно-жорстких закріплень, що обмежують переміщення та обертання відповідних ланок. Вибір типу закріплення істотно впливає на розподіл внутрішніх зусиль і напружень, а отже, має бути обґрунтований з урахуванням реальних умов експлуатації.

Для урахування динамічного характеру роботи маніпулятора у розрахункову схему вводяться коефіцієнти, що відображають вплив прискорень і ударних навантажень. У такому випадку еквівалентні навантаження можуть бути подані з використанням коефіцієнта динамічності, що дозволяє звести змінні навантаження до розрахункових статичних еквівалентів. Це забезпечує можливість застосування аналітичних методів розрахунку без втрати інженерної адекватності.

Сформовані розрахункові схеми використовуються як базис для подальшого аналітичного визначення напружено-деформованого стану та оцінювання втомної міцності металоконструкцій. Вони також слугують основою для встановлення зв'язку між геометричними параметрами, навантажувальними режимами та показниками надійності. Таким чином, коректне формування розрахункових схем є необхідною умовою отримання достовірних результатів і подальшого обґрунтування інженерно-технічних заходів щодо підвищення надійності вантажопідіймальних маніпуляторів.

2.5 Навантажувальні режими та напружено-деформований стан елементів вантажопідіймального маніпулятора при інтенсивній експлуатації

Навантажувальні режими роботи вантажопідіймального маніпулятора в умовах інтенсивної експлуатації формуються поєднанням статичних, квазістатичних і динамічних впливів, що діють на конструктивні елементи протягом робочого циклу. На відміну від номінальних режимів, для яких часто

застосовуються спрощені розрахункові підходи, інтенсивна експлуатація характеризується підвищеною частотою циклів, значною змінністю геометричного положення ланок і нерівномірним розподілом навантажень у часі. Це зумовлює необхідність комплексного аналізу навантажувальних режимів у тісному зв'язку з напружено-деформованим станом елементів маніпулятора.

До основних зовнішніх навантажень, що визначають силовий стан конструкції, належать сила ваги вантажу, власна вага елементів маніпулятора, зусилля гідроприводу, а також інерційні сили, пов'язані з прискореннями ланок. У загальному випадку результуюче навантаження на елемент конструкції може бути подане як сума статичної та динамічної складових

$$Q_{\text{екв}} = Q_{\text{ст}} + Q_{\text{дин}} \quad (2.13)$$

де $Q_{\text{ст}}$ – навантаження від ваги вантажу та власної маси елементів;

$Q_{\text{дин}}$ – динамічна складова, обумовлена прискореннями та ударними ефектами.

Для практичних інженерних розрахунків динамічний вплив доцільно враховувати через коефіцієнт динамічності, що дозволяє звести змінні навантаження до еквівалентних статичних. У цьому випадку розрахункове навантаження визначається за виразом

$$Q_p = \varphi_d \cdot Q_{\text{ст}} \quad (2.14)$$

де φ_d – коефіцієнт динамічності, значення якого залежить від швидкості руху, характеру пусків і гальмувань, а також від жорсткості кінематичного ланцюга.

Інтенсивна експлуатація маніпулятора супроводжується багаторазовим повторенням робочих циклів, у кожному з яких навантаження змінюються за величиною та напрямком. У результаті силовий вплив на елементи конструкції має циклічний характер, що є визначальним чинником формування втомних напружень. Кількість циклів навантаження за період експлуатації може бути

подана як

$$N = n_{\text{ц}} \cdot T_{\text{експ}} \quad (2.15)$$

де $n_{\text{ц}}$ – середня кількість робочих циклів за одиницю часу,

$T_{\text{експ}}$ – тривалість експлуатації.

З позицій опору матеріалів напружено-деформований стан основних елементів маніпулятора визначається дією згинальних і крутних моментів, а також осьових сил. Для металоконструкцій стріли найбільш характерним є згинальний режим навантаження, величина якого залежить від маси вантажу та радіуса вильоту. Згинальний момент у небезпечному перерізі може бути поданий у вигляді

$$M = Q_p \cdot l \quad (2.16)$$

де l – відстань від осі обертання або опори до розглядуваного перерізу.

Відповідні нормальні напруження при згині визначаються класичною залежністю

$$\sigma = \frac{M}{W}, \quad (2.17)$$

де W – момент опору перерізу.

Зміна радіуса вильоту та маси вантажу в процесі роботи призводить до змінного рівня напружень, що формує цикл навантаження з певною амплітудою.

Окрім згину, елементи маніпулятора можуть зазнавати крутіння, особливо в зонах шарнірних з'єднань і при асиметричному навантаженні. Дотичні напруження при крученні визначаються як

$$\tau = \frac{M}{W_p}, \quad (2.18)$$

де T – крутний момент;

W_p – полярний момент опору перерізу.

У реальних умовах експлуатації згин і кручення часто діють одночасно, що зумовлює складний напружений стан.

Для оцінювання загального рівня напруженості матеріалу доцільно використовувати еквівалентні напруження, які дозволяють привести складний напружений стан до еквівалентного одновісного. У рамках енергетичної гіпотези еквівалентні напруження можуть бути визначені за виразом

$$\sigma_{\text{екв}} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} . \quad (2.19)$$

Отримані значення еквівалентних напружень використовуються для перевірки умов міцності та подальшого оцінювання втомної довговічності.

На основі встановлення навантажувальних режимів роботи вантажопідіймального маніпулятора при інтенсивній експлуатації формують складний, змінний у часі напружено-деформований стан його елементів. Висока циклічність навантажень, поєднання згину та кручення, а також вплив динамічних складових створюють передумови для розвитку втомних пошкоджень і зниження надійності. Отримані аналітичні залежності між навантаженнями, внутрішніми зусиллями та напруженнями є вихідною базою для подальшого оцінювання втомної міцності та довговічності металоконструкцій, що буде розглянуто в наступному підрозділі.

2.6 Оцінювання втомної міцності та довговічності металоконструкцій

Оцінювання втомної міцності та довговічності металоконструкцій вантажопідіймальних маніпуляторів є визначальним етапом розрахункового аналізу надійності, оскільки саме втомне руйнування найчастіше обмежує ресурс елементів, що працюють у режимах інтенсивної циклічної експлуатації.

Для маніпуляторного устаткування характерні багаторазові зміни навантажень, поєднання згину та кручення, а також наявність зон концентрації напружень, що істотно прискорює накопичення втомних пошкоджень.

У загальному випадку втомна міцність матеріалу оцінюється на основі залежності між амплітудою напружень і числом циклів до руйнування. Для металоконструкцій, що працюють у пружній області, така залежність описується кривою втоми (S-N кривою), яка у логарифмічних координатах може бути подана степеневою функцією

$$\sigma_a^m \cdot N = C. \quad (2.20)$$

де σ_a – амплітуда циклічних напружень;

N – кількість циклів до настання втомного руйнування;

m і C – матеріальні коефіцієнти, що визначаються експериментально.

Для елементів маніпулятора, у яких напруження змінюються в асиметричному циклі, важливе значення має вплив середнього напруження. У такому випадку для приведення реального циклу до еквівалентного симетричного застосовуються коригувальні залежності. Однією з поширених інженерних гіпотез є лінійна залежність типу Гудмана, яка для приведеної амплітуди напружень може бути записана у вигляді

$$\sigma_{a,пр} = \frac{\sigma_a}{1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_b}}. \quad (2.21)$$

де σ_m – середнє напруження циклу;

σ_b – тимчасовий опір матеріалу.

Отримане приведенне значення амплітуди використовується для подальшого визначення довговічності за кривою втоми.

Суттєвий вплив на втомну міцність металоконструкцій мають концентрації напружень, характерні для зон зварних з'єднань, отворів, різких

переходів перерізів і місць кріплення гідроциліндрів. Для урахування цього впливу в розрахунках вводиться коефіцієнт концентрації напружень, у результаті чого розрахункова амплітуда напружень визначається як

$$\sigma_{a,p} = k_{\sigma} \cdot \sigma_a, \quad (2.22)$$

де k_{σ} – коефіцієнт концентрації напружень, що залежить від геометрії елемента та якості виконання з'єднань. Зростання цього коефіцієнта істотно зменшує допустиме число циклів i , відповідно, ресурс конструкції.

У реальних умовах експлуатації вантажопідіймальних маніпуляторів навантаження мають змінну амплітуду, що ускладнює безпосереднє застосування кривих втоми. Для таких випадків довговічність доцільно оцінювати за принципом лінійного накопичення пошкоджень. Узагальнено ступінь втомного пошкодження може бути визначена як

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i}, \quad (2.23)$$

де n_i – кількість циклів з амплітудою $\sigma_{a,i}$;

N_i – допустиме число циклів до руйнування при цій амплітуді.

Втомне руйнування вважається таким, що настає, коли величина D досягає одиниці.

На основі оцінювання втомної міцності визначається розрахунковий ресурс металоконструкцій маніпулятора. Ресурс у циклах або в одиницях часу порівнюється з нормативним або заданим терміном експлуатації, що дозволяє зробити висновок щодо достатності запасу довговічності. У разі, якщо розрахунковий ресурс є недостатнім, виникає необхідність у коригуванні конструктивних параметрів або режимів експлуатації, зокрема шляхом зменшення напружень, зниження концентрації напружень або обмеження інтенсивності навантаження.

Отже, оцінювання втомної міцності та довговічності металоконструкцій

вантажопідіймальних маніпуляторів базується на визначенні амплітуд і характеру циклічних напружень, урахуванні впливу середніх напружень і концентрацій, а також аналізі накопичення пошкоджень у часі. Отримані результати дозволяють кількісно оцінити ресурс конструктивних елементів і створюють розрахункову основу для формування інженерно-технічних заходів, спрямованих на підвищення надійності маніпуляторного устаткування в умовах інтенсивної експлуатації.

2.7 Розрахунок показників надійності гідравлічних елементів маніпулятора

Гідравлічні елементи вантажопідіймального маніпулятора відіграють ключову роль у забезпеченні його працездатності, оскільки саме вони реалізують силову взаємодію між приводом і механічною частиною конструкції. Надійність гідравлічної системи безпосередньо визначає плавність руху ланок, точність позиціонування вантажу та безпеку експлуатації в цілому. В умовах інтенсивної експлуатації гідравлічні елементи працюють за підвищених тисків, температур і частоти циклів, що зумовлює необхідність їх кількісного аналізу з позицій теорії надійності.

До основних гідравлічних елементів маніпулятора належать гідроциліндри, гідролінії, розподільча та запобіжна апаратура, ущільнювальні елементи, а також робоча рідина. Відмови цих компонентів, як правило, мають випадковий характер і пов'язані з зношуванням ущільнень, деградацією поверхонь тертя, забрудненням робочої рідини або порушенням герметичності. Тому для оцінювання їх надійності доцільно застосовувати імовірнісні моделі відмов.

Ймовірність безвідмовної роботи гідравлічного елемента протягом часу t визначається залежністю

$$P(t) = \exp(-\lambda t), \quad (2.24)$$

де λ – інтенсивність відмов, яка для елементів гідроприводу може вважатися сталою на ділянці нормальної експлуатації. Значення інтенсивності відмов визначається експериментально або за експлуатаційними даними й залежить від рівня робочого тиску, температурного режиму та якості обслуговування.

Важливим показником є середній напрацювання до відмови, який для експоненціального закону розподілу визначається як

$$T_{\text{ф}} = \frac{1}{\lambda}. \quad (2.25)$$

Цей показник дозволяє порівнювати різні конструктивні варіанти гідравлічних елементів і оцінювати ефективність заходів щодо підвищення їх надійності.

Для гідроциліндрів, що працюють у циклічному режимі, доцільно використовувати напрацювання, виражене кількістю робочих циклів. У такому випадку інтенсивність відмов може бути подана у вигляді

$$\lambda_N = \frac{1}{N_{\text{ср}}}. \quad (2.26)$$

де $N_{\text{ср}}$ – середнє число циклів до відмови. Це дозволяє безпосередньо пов'язати показники надійності з режимами експлуатації маніпулятора.

Надійність гідравлічної системи в цілому визначається надійністю окремих елементів, які в більшості випадків з'єднані послідовно з точки зору функціонування. За такої структури ймовірність безвідмовної роботи системи визначається як

$$P_{\text{гс}} = \prod_{i=1}^n P_i \quad (2.27)$$

де P_i – середнє число циклів до відмови. Це дозволяє безпосередньо пов'язати показники надійності з режимами експлуатації маніпулятора.

Надійність гідравлічної системи в цілому визначається надійністю окремих елементів, які в більшості випадків з'єднані послідовно з точки зору

функціонування. За такої структури ймовірність безвідмовної роботи системи визначається як

$$\lambda = \lambda_0 \cdot k_p \cdot k_t \cdot k_z \quad (2.28)$$

де λ_0 – базове значення інтенсивності відмов;

k_p, k_t, k_z — коефіцієнти, що враховують відповідно вплив тиску, температури та забруднення.

Розрахунок показників надійності гідравлічних елементів маніпулятора базується на застосуванні імовірнісних моделей відмов, визначенні інтенсивності відмов і середнього напрацювання до відмови, а також урахуванні впливу експлуатаційних факторів. Отримані показники дозволяють оцінити внесок гідравлічної системи в загальну надійність вантажопідіймального маніпулятора та слугують основою для подальшого формування функціональних залежностей між навантаженнями, напруженнями та показниками надійності, що буде розглянуто в наступному підрозділі.

2.8 Отримання функціональних залежностей між експлуатаційними навантаженнями, напруженнями та показниками надійності

Завершальним етапом теоретичного дослідження є встановлення функціональних залежностей, що пов'язують експлуатаційні навантаження вантажопідіймального маніпулятора з напружено-деформованим станом його елементів і показниками надійності. Саме ці залежності забезпечують перехід від окремих розрахункових результатів до узагальненої інженерної моделі, придатної для прогнозування ресурсу та обґрунтування інженерно-технічних заходів щодо підвищення надійності в умовах інтенсивної експлуатації.

Експлуатаційні навантаження маніпулятора визначаються сукупністю параметрів, до яких належать маса вантажу, радіус вильоту, швидкість переміщення, характер пусків і гальмувань, а також кількість робочих циклів. У загальному вигляді вектор навантажень може бути поданий як

$$Q = (Q, l, v, n_{\text{ц}}), \quad (2.29)$$

де Q – сила ваги вантажу;

l – радіус вильоту;

v – характерна швидкість руху;

$n_{\text{ц}}$ – інтенсивність циклів навантаження.

На основі сформованих у попередніх підрозділах розрахункових схем і навантажувальних режимів напружено-деформований стан елементів маніпулятора може бути поданий у вигляді функції від експлуатаційних параметрів

$$\sigma_{\text{екв}} = (Q, l, \varphi_d), \quad (2.30)$$

де $\sigma_{\text{екв}}$ – еквівалентні напруження в небезпечному перерізі;

φ_d – коефіцієнт динамічності, що відображає інтенсивність руху та режим роботи.

Ця залежність дозволяє безпосередньо оцінювати вплив зміни режимів експлуатації на рівень напружень у металоконструкціях.

Подальший зв'язок між напруженим станом і довговічністю встановлюється через залежності втомної міцності. З урахуванням приведеної амплітуди напружень ресурс металоконструкцій у циклах може бути поданий як

$$N = g(\sigma_{a,\text{пр}}), \quad (2.31)$$

де $g(\sigma_{a,\text{пр}})$ – функція визначається характеристиками матеріалу та типом напруженого стану. Таким чином, поєднання залежностей (2.30) і (2.31) дозволяє отримати функціональний зв'язок між експлуатаційними навантаженнями та ресурсом елементів маніпулятора.

Для гідравлічних елементів аналогічний підхід реалізується шляхом встановлення залежності інтенсивності відмов від режимів навантаження і умов експлуатації. У загальному вигляді ця залежність може бути записана як

$$\lambda = h(Q, p, T), \quad (2.32)$$

де p – робочий тиск у гідросистемі;

T – температурний режим;

З урахуванням цієї залежності ймовірність безвідмовної роботи гідравлічних елементів визначається через експоненціальну модель, що безпосередньо пов'язує експлуатаційні параметри з показниками надійності.

На рівні системи вантажопідіймального маніпулятора загальна надійність формується як функція надійності механічних і гідравлічних складників. У спрощеному вигляді це може бути подано як

$$P_{\text{сист}} = F(\sigma_{\text{екв}}, N, \lambda), \quad (2.33)$$

де F – функція відображає структурну схему маніпулятора та характер взаємозв'язку його елементів. Такий підхід дозволяє оцінювати зміну загальної надійності при варіюванні навантажень, геометричних параметрів або режимів експлуатації.

Отримані функціональні залежності мають важливе прикладне значення, оскільки вони дозволяють перейти від нормативно-фіксованих режимів роботи до адаптивного управління надійністю. На їх основі можливе прогнозування ресурсу маніпулятора, оцінювання впливу інтенсифікації експлуатації на рівень ризику відмов і вибір оптимальних інженерно-технічних рішень, спрямованих на зниження напружень, обмеження динамічних навантажень або підвищення довговічності окремих елементів.

Таким чином, встановлення функціональних залежностей між експлуатаційними навантаженнями, напруженнями та показниками надійності завершує формування розрахункової моделі вантажопідіймального маніпулятора. Отримані залежності створюють науково-інженерну основу для розроблення та обґрунтування інженерно-технічних заходів щодо підвищення надійності устаткування, які будуть детально розглянуті у третьому розділі магістерської роботи.

3 РОЗРОБЛЕННЯ ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНИХ ЗАХОДІВ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВАНТАЖОПІДІЙМАЛЬНОГО УСТАТКОВАННЯ

Практична реалізація теоретичних і розрахункових положень, сформульованих у другому розділі магістерської роботи, здійснюється шляхом розроблення комплексу інженерно-технічних заходів, спрямованих на підвищення надійності вантажопідіймального устаткування маніпуляторного типу. Ключовим завданням є перехід від узагальнених функціональних залежностей між експлуатаційними навантаженнями, напружено-деформованим станом і показниками надійності до конкретних конструктивних, технологічних та експлуатаційних рішень, адаптованих до умов інтенсивної роботи маніпуляторів.

Обґрунтування таких рішень базується на системному підході, за якого вантажопідіймальне устаткування розглядається як сукупність взаємопов'язаних механічних і гідравлічних елементів, відмови яких мають комплексний характер. Узгоджене вдосконалення конструкції металоконструкцій, параметрів гідроприводу, режимів експлуатації та технічного обслуговування дозволяє не лише зменшити ймовірність відмов окремих складників, але й забезпечити підвищення надійності маніпулятора в цілому.

3.1 Обґрунтування напрямів підвищення надійності маніпуляторного устаткування

Обґрунтування напрямів підвищення надійності вантажопідіймального маніпуляторного устаткування базується на результатах аналізу умов інтенсивної експлуатації, характерних видів відмов, а також на встановлених у

другому розділі функціональних залежностях між експлуатаційними навантаженнями, напружено-деформованим станом і показниками надійності. Отримані теоретичні положення свідчать, що зниження надійності маніпуляторів зумовлюється, як правило, не одним ізольованим чинником, а сукупною дією механічних, гідравлічних і експлуатаційних факторів.

Одним з ключових напрямів підвищення надійності є зниження рівня напружень у найбільш навантажених елементах металоконструкцій. Як показано в розділі 2, амплітуда циклічних напружень істотно залежить від маси вантажу, радіуса вильоту та динамічних режимів руху. Тому інженерно-технічні заходи мають бути спрямовані на оптимізацію геометричних параметрів конструкції, підвищення жорсткості в зонах концентрації напружень і зменшення впливу динамічних складових навантаження. Реалізація таких заходів дозволяє безпосередньо підвищити втомну довговічність металоконструкцій і збільшити їх розрахунковий ресурс.

Важливим напрямом є підвищення надійності вузлів з'єднання та шарнірних пар, які в умовах інтенсивної експлуатації зазнають підвищеного зношування і є джерелом додаткових динамічних навантажень. Збільшення люфтів у з'єднаннях призводить до нерівномірного розподілу зусиль між ланками маніпулятора, що, у свою чергу, негативно впливає на напружено-деформований стан металоконструкцій. У зв'язку з цим одним із пріоритетних напрямів є вдосконалення конструкції шарнірних вузлів і підвищення стабільності їх експлуатаційних параметрів у часі.

Окрему групу напрямів підвищення надійності становлять заходи, спрямовані на вдосконалення гідравлічної системи маніпулятора. Як показано в підрозділі 2.8, інтенсивність відмов гідравлічних елементів істотно залежить від режимів тиску, температури та чистоти робочої рідини. Тому підвищення надійності гідроприводу можливе шляхом оптимізації робочих параметрів, удосконалення системи фільтрації та зменшення пікових навантажень у

перехідних режимах роботи.

Не менш важливим напрямом є оптимізація режимів експлуатації та технічного обслуговування маніпуляторного устаткування. Навіть за наявності досконалих конструктивних рішень порушення рекомендованих режимів навантаження або скорочення інтервалів обслуговування призводить до прискореної деградації елементів і зниження загальної надійності. У цьому контексті інженерно-технічні заходи повинні враховувати не лише конструктивні зміни, але й регламентацію експлуатаційних параметрів та організацію контролю технічного стану.

Таким чином, напрями підвищення надійності вантажопідіймального маніпуляторного устаткування доцільно формувати на основі:

- 1) системного підходу, що поєднує зниження напружень у металоконструкціях;
- 2) підвищення довговічності вузлів з'єднання, удосконалення гідравлічної системи;
- 3) оптимізацію експлуатаційних режимів.

Реалізація зазначених напрямів створює передумови для розроблення конкретних інженерно-технічних заходів, які будуть детально розглянуті в наступних підрозділах розділу 3.

3.2 Удосконалення конструктивних рішень елементів вантажопідіймального маніпулятора

Удосконалення конструктивних рішень елементів вантажопідіймального маніпулятора є одним з найбільш ефективних шляхів підвищення його надійності в умовах інтенсивної експлуатації. Як показано в розділі 2, зниження ресурсу маніпуляторного устаткування зумовлюється насамперед підвищеними циклічними напруженнями в металоконструкціях, наявністю локальних

концентрацій напружень, а також нерівномірним розподілом зусиль між окремими елементами конструкції. У зв'язку з цим конструктивні заходи мають бути спрямовані на зменшення рівня напружень, підвищення жорсткості та стабільності роботи вузлів, а також на зниження чутливості конструкції до змін експлуатаційних режимів.

Одним із пріоритетних напрямів удосконалення є оптимізація геометрії металоконструкцій стріли та несучих елементів маніпулятора. Зміна форми поперечних перерізів, збільшення їх моментів опору та раціональний розподіл матеріалу дозволяють зменшити згинальні напруження без істотного збільшення маси конструкції. Особливо ефективним є локальне підсилення зон, у яких за результатами розрахунків напружено-деформованого стану спостерігаються максимальні амплітуди напружень, зокрема в місцях кріплення гідроциліндрів, у перехідних ділянках перерізів і поблизу опорних вузлів.

Важливим аспектом удосконалення конструкції є зменшення концентрацій напружень, які суттєво впливають на втомну міцність металоконструкцій. Це досягається шляхом згладжування різких геометричних переходів, збільшення радіусів заокруглень, оптимізації конфігурації вирізів і отворів, а також застосування більш раціональних схем зварних з'єднань. Підвищення якості зварювання та використання конструктивних рішень, що зменшують вплив залишкових напружень, сприяє збільшенню довговічності елементів у циклічних режимах навантаження.

Окрему увагу доцільно приділити удосконаленню шарнірних вузлів і з'єднань, які в умовах інтенсивної експлуатації зазнають підвищеного зношування та є джерелом додаткових динамічних навантажень. Застосування змінних втулок із зносостійких матеріалів, підвищення точності виготовлення спряжених поверхонь і впровадження конструкцій, що забезпечують стабільне змащування, дозволяють зменшити люфти та підвищити кінематичну жорсткість маніпулятора. Це, у свою чергу, знижує рівень ударних навантажень

і сприяє більш рівномірному розподілу зусиль між елементами конструкції.

Удосконалення конструктивних рішень стосується також елементів кріплення гідроприводу, зокрема вушок гідроциліндрів і опорних пальців. Перерозподіл зусиль у цих вузлах за рахунок зміни схеми навантаження або збільшення площі контакту дозволяє знизити контактні напруження та сповільнити процеси зношування. Крім того, застосування високоміцних матеріалів і поверхневих зміцнювальних технологій у найбільш навантажених зонах забезпечує додатковий резерв надійності без суттєвого ускладнення конструкції.

Таким чином, удосконалення конструктивних рішень елементів вантажопідіймального маніпулятора повинно здійснюватися на основі результатів розрахункового аналізу напружено-деформованого стану та втомної довговічності. Раціональна оптимізація геометрії металоконструкцій, зниження концентрацій напружень і підвищення надійності вузлів з'єднання створюють необхідні передумови для збільшення ресурсу маніпуляторного устаткування та забезпечують основу для подальшого впровадження технологічних і експлуатаційних заходів, спрямованих на підвищення його надійності в умовах інтенсивної експлуатації.

3.3 Розрахункове обґрунтування підвищення міцності та довговічності металоконструкцій

Розрахункове обґрунтування підвищення міцності та довговічності металоконструкцій вантажопідіймального маніпулятора базується на аналітичних залежностях, отриманих у другому розділі, та на запропонованих у підрозділі 3.2 конструктивних удосконаленнях. Метою даного етапу є кількісне підтвердження того, що внесені зміни до геометрії та конструкції елементів забезпечують зниження рівня напружень, зменшення амплітуди циклічних

навантажень і, як наслідок, збільшення ресурсу металоконструкцій в умовах інтенсивної експлуатації.

Вихідним положенням для розрахункового обґрунтування є залежність між згинальним моментом, що діє в небезпечному перерізі елемента, та нормальними напруженнями. Для базового конструктивного виконання максимальні напруження визначаються за виразом

$$\sigma_0 = \frac{M}{W_0}, \quad (3.1)$$

де M – розрахунковий згинальний момент.

W_0 – момент опору поперечного перерізу вихідної конструкції.

Як показано результатами аналізу навантажувальних режимів, значення σ_0 у ряді перерізів наближається до гранично допустимого для умов циклічного навантаження, що обмежує довговічність металоконструкцій.

Запропоновані конструктивні удосконалення передбачають зміну геометричних параметрів перерізу з метою збільшення його моменту опору. Для вдосконаленого варіанта конструкції напруження визначаються як

$$\sigma_1 = \frac{M}{W_1}, \quad (3.2)$$

де $W_1 > W_0$.

Збільшення моменту опору навіть на відносно невелику величину призводить до помітного зниження рівня напружень, що є принципово важливим для втомної міцності, оскільки довговічність конструкції нелінійно залежить від амплітуди напружень.

Кількісна оцінка ефективності запропонованих заходів може бути виконана шляхом визначення відносного зниження напружень

$$\Delta\sigma = \frac{\sigma_0 - \sigma_1}{\sigma_0}, \quad (3.3)$$

Отримане значення характеризує резерв підвищення міцності та створює передумови для збільшення допустимого числа циклів навантаження.

Подальше обґрунтування виконується з позицій втомної довговічності. Відповідно до степеневі залежності кривої втоми, ресурс металоконструкції у циклах може бути поданий як

$$N = C \cdot \sigma_a^{-m}, \quad (3.4)$$

де σ_a амплітуда циклічних напружень.

Зменшення амплітуди напружень у результаті конструктивних змін призводить до зростання ресурсу, причому навіть відносно невелике зниження σ_a забезпечує кратне збільшення числа циклів до руйнування.

З урахуванням цього відносно зростання довговічності для вдосконаленої конструкції може бути оцінене як

$$\frac{N_1}{N_0} = \left(\frac{\sigma_{a,0}}{\sigma_{a,1}} \right)^m, \quad (3.5)$$

де 0 і 1 – індекси відповідають вихідному та вдосконаленому варіантам.

Дана залежність наочно демонструє високу ефективність заходів, спрямованих на зниження рівня напружень у небезпечних перерізах металоконструкцій.

Окремо враховується вплив концентрації напружень, характерної для зон зварних з'єднань і геометричних переходів. У результаті конструктивних змін коефіцієнт концентрації напружень зменшується, що дозволяє знизити розрахункову амплітуду напружень

$$\sigma_{a,p} = k_\sigma \cdot \sigma_a / \quad (3.6)$$

Зменшення коефіцієнта k_σ додатково підвищує втомну довговічність і знижує ймовірність зародження тріщин у критичних зонах.

Таким чином, розрахункове обґрунтування підтверджує, що

запропоновані конструктивні удосконалення металоконструкцій вантажопідіймального маніпулятора забезпечують зниження рівня напружень, зменшення впливу концентрацій і суттєве збільшення втомної довговічності. Отримані результати свідчать про доцільність реалізації зазначених заходів в умовах інтенсивної експлуатації та створюють надійну інженерну основу для підвищення загальної надійності вантажопідіймального устаткування.

Прийняті вихідні дані та допущення для числового розрахунку: вантаж $m=2000$ кг·м=2000, радіус вильоту $l=5,0$ м, коефіцієнт динамічності $\varphi_d=1,25$ (інтенсивні пуски/гальмування), матеріал металоконструкції – сталь Strenx 700 (виробник Strenx®, SSAB) з мінімальною межею текучості $Re \geq 700$ МПа. Для корекції за середніми напруженнями (гіпотеза Гудмана) консервативно прийнято мінімальну межу міцності $\sigma_b=750$ МПа (для Strenx 700MC Plus у діапазоні 750-950 МПа).

Елемент стріли змодельовано як прямокутна замкнена тонкостінна балка (RHS). Для вихідного варіанта прийнято переріз $200 \times 150 \times 8$ мм, для удосконаленого – $220 \times 160 \times 8$ мм. Для концентрації напружень прийнято $k_{\sigma,0}=1,5$ (вихідний стан з локальними концентраторами) та $k_{\sigma,1}=1,5$ (після конструктивного вдосконалення: згладження переходів /підсилення /оптимізація вузла). Цикл напружень прийнято пульсуючим $0 \rightarrow \sigma_{\max}$, тому $\sigma_a = \sigma_{\max}/2$, $\sigma_m = \sigma_{\max}/2$. Для оцінки довговічності використано степеневу модель типу Basquin з показником $m=3$ і калібруванням за умовною опорною точкою $N_{\text{ref}}=2 \cdot 10^6$ циклів при $\sigma_{a,\text{ref}}=160$ МПа (інженерне прийняте значення для порівняльного розрахунку).

Аналіз числових результатів, наведених у таблиці 3.1, свідчить про лінійний характер зростання номінальних і локальних максимальних напружень у металоконструкції стріли зі збільшенням радіуса вильоту маніпулятора в діапазоні 3-8 м. Для вихідного конструктивного варіанта при вильоті понад 6-7 м спостерігається різке зростання локальних напружень (рис. 3.1), зумовлене поєднанням збільшеного згинального моменту та підвищеного коефіцієнта

концентрації напружень.

Таблиця 3.1 – Напруження від вильоту маніпулятора

Виліт маніпулятора, м	Номінальні напруження, вихідна конструкція, МПа	Максимальні локальні напруження, вихідна конструкція, МПа	Номінальні напруження, удосконалена конструкція, МПа	Максимальні локальні напруження, удосконалена конструкція, МПа
3	145,0	217,6	121,1	145,3
4	193,4	290,1	161,5	193,8
5	241,7	362,6	201,8	242,2
6	290,1	435,1	242,2	290,6
7	338,4	507,6	282,6	339,1
8	386,8	580,1	322,9	387,5

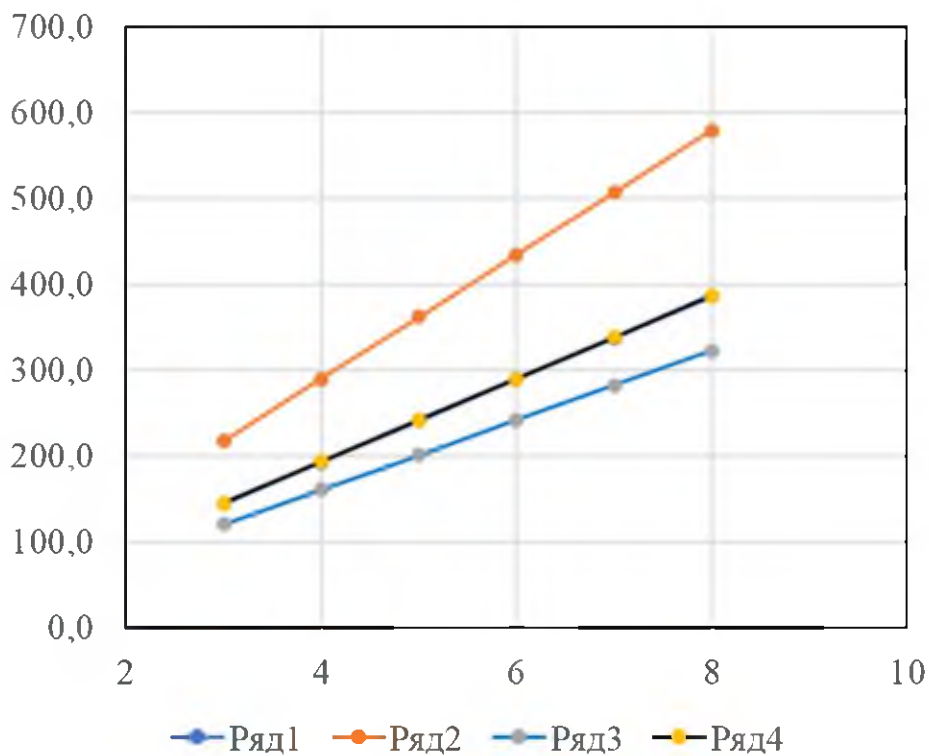


Рисунок 3.1 – Графіки локальних напружень для конструктивних варіантів при вильоті стріли маніпулятора понад 6-7 м

Удосконалений конструктивний варіант характеризується стабільно нижчим рівнем напружень у всьому досліджуваному діапазоні вильоту. Зниження максимальних локальних напружень становить у середньому 15-20% порівняно з вихідною конструкцією, що підтверджує ефективність збільшення моменту опору перерізу та зменшення концентрації напружень у критичних зонах. Отримані результати створюють передумови для підвищення як міцності, так і довговічності металоконструкцій при інтенсивній експлуатації.

Результати розрахунку коефіцієнта запасу міцності за текучістю (табл. 3.2) показують суттєву залежність працездатності конструкції від якості застосованої сталі та радіуса вильоту маніпулятора. Для вихідного конструктивного варіанта зі сталлю класу Strenx 500 при вильоті 7-8 м коефіцієнт запасу знижується нижче одиниці, що вказує на ризик виникнення пластичних деформацій і обмежує допустимі режими експлуатації.

Таблиця 3.2 – Коефіцієнт запасу міцності за текучістю сталі

Виліт стріли, м	Сталь Strenx 500		Сталь Strenx 700		Сталь Strenx 900	
	вихідна конструкція	удосконалена конструкція	вихідна конструкція	удосконалена конструкція	вихідна конструкція	удосконалена конструкція
3	2,30	3,44	3,22	4,82	4,14	6,19
4	1,72	2,58	2,41	3,61	3,10	4,64
5	1,38	2,06	1,93	2,89	2,48	3,72
6	1,15	1,72	1,61	2,41	2,07	3,10
7	0,98	1,47	1,38	2,06	1,77	2,65
8	0,86	1,29	1,21	1,81	1,55	2,32

Застосування сталей підвищеної міцності (Strenx 700 і Strenx 900) суттєво підвищує запас міцності у всьому діапазоні вильоту, однак навіть у цьому випадку вихідна конструкція демонструє тенденцію до зменшення запасу при максимальних вильотах (рис. 3.2). Удосконалений варіант конструкції забезпечує збільшення коефіцієнта запасу на 30-50% залежно від марки сталі,

що дозволяє зберігати пружний характер деформації навіть за інтенсивних режимів навантаження та великих радіусів вильоту (рис. 3.3).

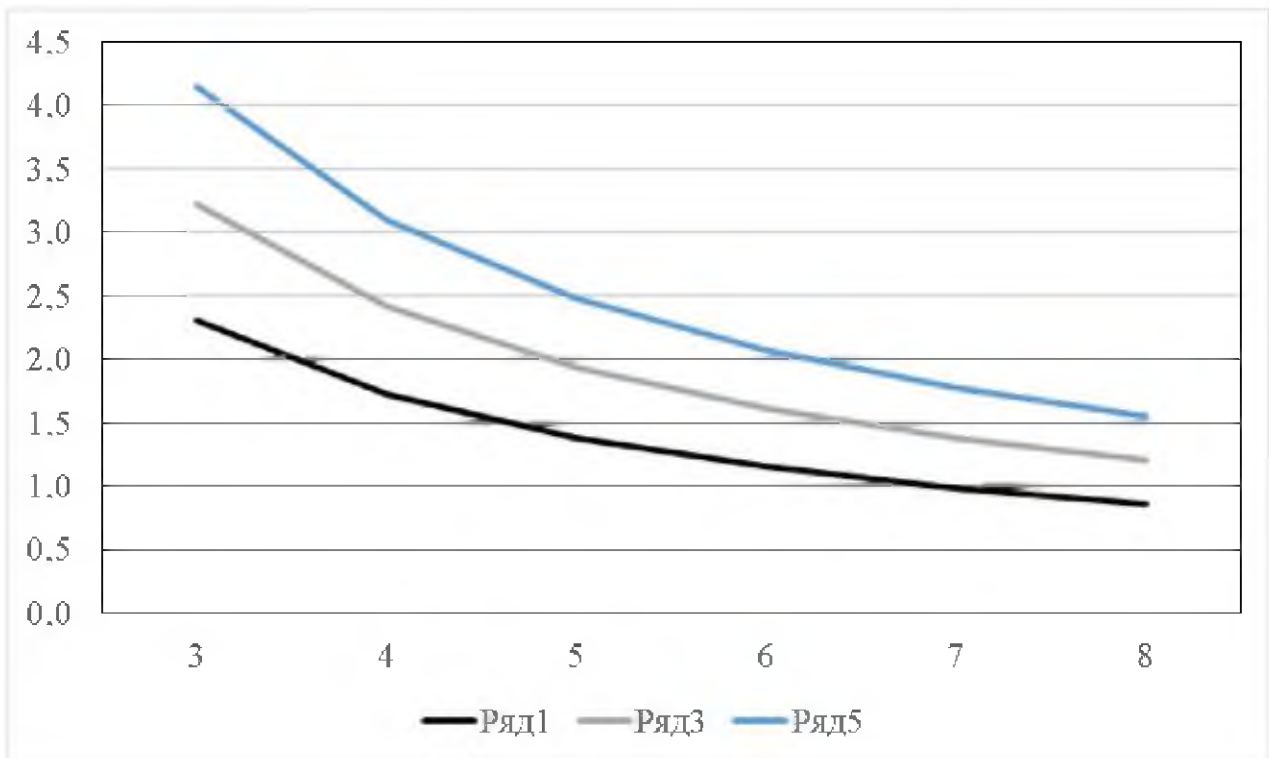


Рисунок 3.2 – Графіки залежності коефіцієнтів запасу міцності від текучісті металу Strenx (500/700/900) для вихідної конструкції

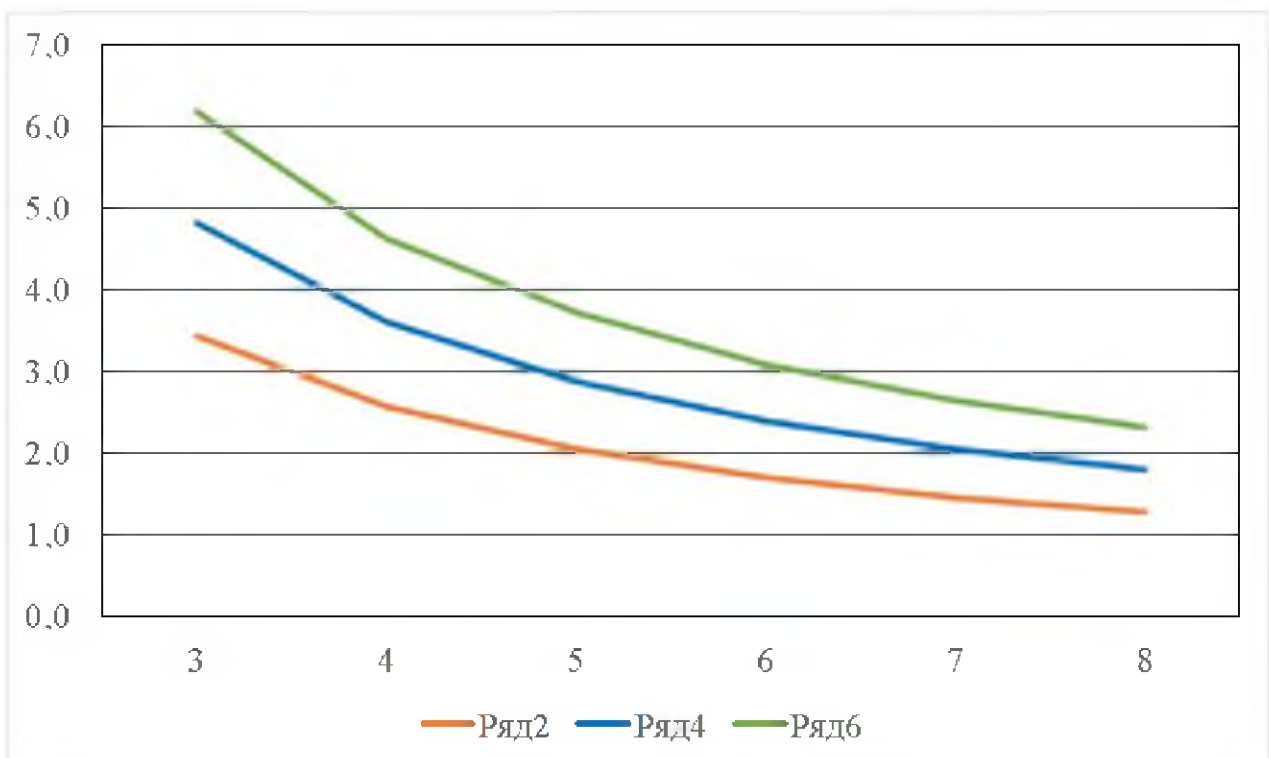


Рисунок 3.3 – Графіки залежності коефіцієнтів запасу міцності від текучісті металу Strenx (500/700/900) для удосконаленої конструкції

Оцінювання втомної довговічності металоконструкцій, як функції радіуса вильоту показало різко нелінійний характер зменшення ресурсу зі зростанням навантаження (табл. 3.3 і рис. 3.4). Для вихідної конструкції спостерігається стрімке зниження кількості допустимих циклів при переході до великих вильотів, що є характерною ознакою роботи конструкції в умовах підвищених циклічних напружень.

Таблиця 3.3 – Втомна довговічність металоконструкцій

Виліт, м	N (Strenx 500), вихідна конструкція	N (Strenx 500), удосконалена конструкція	N (Strenx 700), вихідна конструкція	N (Strenx 700), удосконалена конструкція	N (Strenx 900), вихідна конструкція	N (Strenx 900), удосконалена конструкція
3	3670000	15000000	3980000	15700000	4380000	16700000
4	1260000	5550000	1410000	5950000	1510000	6480000
5	515000	2480000	599000	2720000	717000	3030000
6	234000	1250000	285000	1400000	358000	1600000
7	113000	679000	145000	779000	193000	919000
8	57000	389000	77400	459000	109000	559000

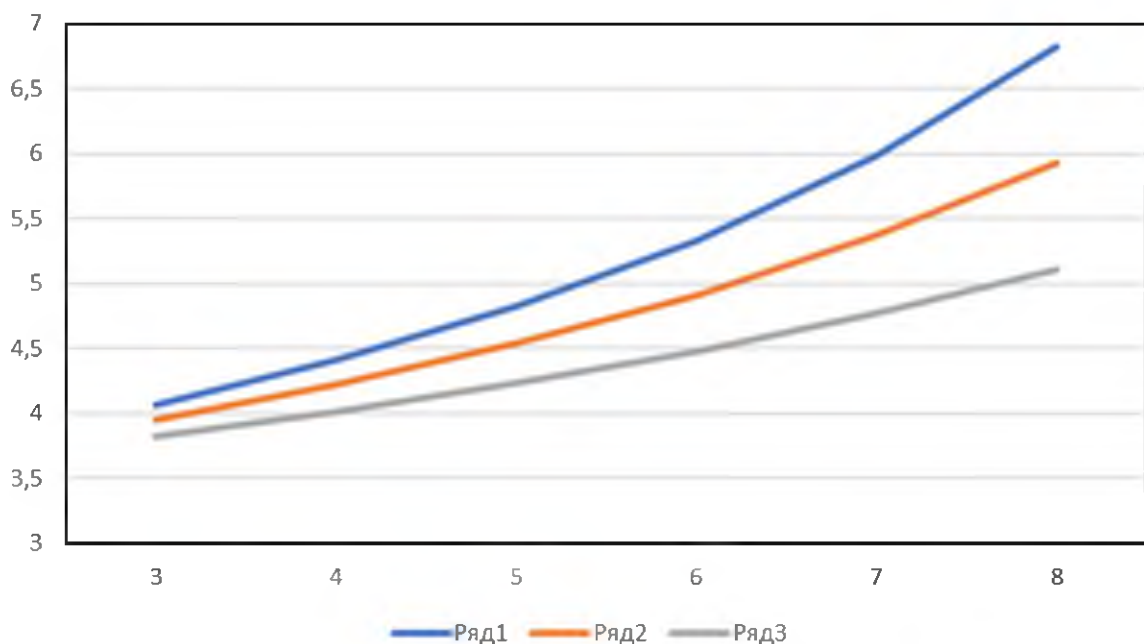


Рисунок 3.4 – Втомна довговічність металоконструкцій

Запропоновані конструктивні удосконалення забезпечують кратне збільшення втомної довговічності у всьому досліджуваному діапазоні вильоту. Залежно від марки сталі та режиму навантаження приріст ресурсу становить приблизно 4-7 разів, причому найбільший ефект досягається при великих вильотах, де вплив концентрації напружень є визначальним. Отримані результати переконливо підтверджують, що зменшення рівня напружень і концентрацій є більш ефективним чинником підвищення довговічності, ніж лише застосування сталей підвищеної міцності без конструктивної оптимізації.

Отримані числові результати та графічні залежності підтверджують доцільність реалізації запропонованих конструктивних заходів і створюють розрахункову основу для формування рекомендацій щодо вибору матеріалу та допустимих режимів експлуатації вантажопідіймальних маніпуляторів.

3.4 Інженерно-технічні заходи щодо підвищення надійності гідроприводів і з'єднань

Підвищення надійності вантажопідіймального маніпулятора в умовах інтенсивної експлуатації неможливе без цілеспрямованого вдосконалення гідроприводів і з'єднань, оскільки саме ці елементи визначають стабільність силової взаємодії між приводом і металоконструкціями, плавність робочих рухів та рівень динамічних навантажень. Як показано у другому розділі, відмови гідравлічних елементів і деградація з'єднань мають комплексний характер і часто виступають не лише як самостійна причина втрати працездатності, але й як чинник, що опосередковано прискорює втомне руйнування металоконструкцій.

Одним із ключових інженерно-технічних напрямів підвищення надійності гідроприводу є зниження пікових тисків і коливань тиску в гідросистемі (табл. 3.4). У режимах інтенсивної експлуатації маніпулятора часті пуски, реверси та гальмування призводять до виникнення гідравлічних ударів, які суттєво збільшують навантаження на ущільнювальні елементи, трубопроводи та корпусні деталі. Обмеження швидкості зміни тиску шляхом оптимізації

характеристик розподільчої апаратури, застосування дросельно-клапанних вузлів і впровадження гідроаккумуляторів дозволяє зменшити динамічні перевантаження та підвищити безвідмовність роботи гідроприводу.

Таблиця 3.4 – Інженерно-технічні заходи щодо підвищення надійності гідроприводів і з'єднань вантажопідіймального маніпулятора

№	Елемент або вузол	Інженерно-технічний захід	Причина реалізації	Очікуваний вплив на надійність
1	2	3	4	5
1	Гідросистема в цілому	Обмеження швидкості зміни тиску (дроселювання, клапани плавного пуску)	Гідравлічні удари при пусках і реверсах	Зменшення пікових навантажень, зниження інтенсивності відмов гідроелементів
2	Напірні лінії	Впровадження гідроаккумуляторів	Коливання тиску та ударні навантаження	Стабілізація тиску, підвищення ресурсу трубопроводів і з'єднань
3	Гідроциліндри	Оптимізація режимів роботи (обмеження швидкостей руху)	Підвищене зношування ущільнень	Зменшення зносу, збільшення середнього напрацювання до відмови
4	Робоча рідина	Підтримання оптимального температурного режиму (теплообмінники)	Перегрів, зниження в'язкості	Стабілізація властивостей рідини, зниження зношування пар тертя
5	Фільтраційна система	Багатоступенева фільтрація, індикатори забруднення	Абразивне зношування, заклинювання	Зменшення інтенсивності відмов, підвищення ресурсу гідроапаратури

Продовження табл. 3.4

1	2	3	4	5
6	Ущільнювальні елементи	Використання ущільнень із підвищеною зносо- і термостійкістю	Витоки, деградація матеріалу	Підвищення герметичності та безвідмовності гідросистеми
7	Шарнірні з'єднання	Застосування змінних втулок зі зносостійких матеріалів	Підвищені контактні напруження	Зменшення швидкості зношування, стабілізація зазорів
8	Пальці та осі	Підвищення точності виготовлення та поверхневе зміцнення	Контактна втома, задири	Підвищення контактної витривалості та довговічності
9	Система змащування	Регламентована подача мастила, ущільнені шарніри	Сухе тертя, корозія	Зниження коефіцієнта тертя, подовження ресурсу вузлів
10	З'єднання гідроциліндрів	Оптимізація геометрії кріплень і площі контакту	Концентрація напружень	Зменшення локальних напружень і ризику пошкоджень

Важливим фактором надійності гідравлічних елементів є стабільність температурного режиму робочої рідини. Підвищення температури призводить до зниження в'язкості, прискореного зношування пар тертя та деградації ущільнень, що безпосередньо впливає на інтенсивність відмов. У зв'язку з цим доцільним є застосування теплообмінників, оптимізація робочих циклів з урахуванням теплового навантаження, а також вибір робочих рідин із стабільними в'язкісно-температурними характеристиками. Реалізація зазначених заходів забезпечує зменшення термічного старіння гідросистеми та

підвищує прогнозованість її ресурсу.

Окрему увагу необхідно приділити забезпеченню чистоти робочої рідини, оскільки забруднення є однією з основних причин відмов гідроциліндрів і розподільчої апаратури. Впровадження багатоступневих систем фільтрації, регламентування інтервалів заміни фільтрувальних елементів і застосування індикаторів забруднення дозволяє суттєво знизити абразивний знос і ймовірність заклинювання рухомих елементів. Підвищення чистоти робочої рідини має комплексний ефект, оскільки одночасно зменшує втрати тиску, стабілізує робочі параметри та підвищує загальну надійність гідроприводу.

Надійність з'єднань, зокрема шарнірних вузлів і кріплень гідроциліндрів, є не менш важливим аспектом, оскільки саме в цих елементах концентруються контактні напруження та виникають люфти, що з часом зумовлюють додаткові динамічні навантаження. Застосування зносостійких втулок, підвищення точності виготовлення пальців і отворів, а також використання матеріалів із підвищеною контактною витривалістю дозволяє зменшити швидкість зношування та стабілізувати кінематичні параметри з'єднань упродовж усього терміну експлуатації.

Ефективним інженерно-технічним заходом є також удосконалення системи змащування з'єднань, що працюють у важких умовах навантаження та забруднення. Забезпечення регулярної подачі мастильного матеріалу, застосування ущільнених шарнірів і використання мастил з високою адгезійною здатністю зменшує тертя, запобігає корозії контактних поверхонь і знижує ймовірність аварійного зносу. У результаті підвищується як надійність окремих вузлів, так і довговічність маніпуляторного устаткування в цілому.

Таким чином, інженерно-технічні заходи щодо підвищення надійності гідроприводів і з'єднань повинні реалізовуватися комплексно та узгоджено з конструктивними рішеннями металоконструкцій і режимами експлуатації. Зменшення динамічних навантажень, стабілізація теплового та гідравлічного режимів, підвищення чистоти робочої рідини і довговічності з'єднань створюють необхідні умови для зниження інтенсивності відмов і забезпечують

суттєве підвищення загальної надійності вантажопідіймального маніпулятора в умовах інтенсивної експлуатації.

3.5 Комплексна оцінка ефективності інженерно-технічних заходів щодо підвищення надійності вантажопідіймального устаткування

Комплексна оцінка ефективності запропонованих інженерно-технічних заходів ґрунтується на зіставленні показників надійності, міцності та довговічності вантажопідіймального маніпуляторного устаткування до і після їх впровадження, а також на аналізі техніко-економічних наслідків реалізації цих заходів в умовах інтенсивної експлуатації. Такий підхід дозволяє не лише кількісно підтвердити досягнутий технічний ефект, але й обґрунтувати доцільність впровадження удосконалень з позицій експлуатаційної та економічної ефективності.

Порівняльний аналіз розрахункових результатів, отриманих у підрозділах 3.3 і 3.4, свідчить про суттєве зниження рівня напружень у металоконструкціях стріли та несучих елементів маніпулятора внаслідок оптимізації геометрії перерізів і зменшення концентрацій напружень. Зменшення амплітуди циклічних напружень забезпечило кратне зростання втомної довговічності, особливо в зоні великих радіусів вильоту, які є найбільш навантаженими з точки зору експлуатації. Отримані результати підтверджують, що запропоновані конструктивні заходи створюють стійкий резерв міцності та підвищують ресурс металоконструкцій без необхідності істотного збільшення маси або габаритів устаткування.

Підвищення надійності гідроприводів і з'єднань, досягнуте шляхом зменшення динамічних перевантажень, стабілізації температурного та гідравлічного режимів і вдосконалення системи фільтрації та змащування, призводить до зниження інтенсивності відмов і збільшення середнього

напрацювання до відмови. У комплексі з конструктивними удосконаленнями металоконструкцій це забезпечує зменшення нерівномірності навантажень, зниження рівня ударних впливів і стабілізацію робочих параметрів маніпулятора протягом усього циклу експлуатації.

З техніко-економічної точки зору підвищення надійності вантажопідіймального устаткування проявляється у зменшенні кількості відмов і аварійних зупинок, скороченні витрат на ремонт і заміну зношених елементів, а також у зниженні втрат робочого часу, пов'язаних із простоем обладнання. Збільшення ресурсу основних конструктивних і гідравлічних елементів дозволяє подовжити міжремонтні інтервали та підвищити коефіцієнт технічної готовності маніпулятора, що є особливо важливим для складських і виробничо-логістичних систем з високою інтенсивністю вантажообігу.

Важливою складовою комплексної ефективності є також підвищення експлуатаційної безпеки. Зниження рівня напружень і стабілізація роботи гідроприводу зменшують імовірність раптових відмов і неконтрольованих рухів вантажу, що має безпосередній вплив на безпеку персоналу та збереження матеріальних цінностей. У цьому контексті запропоновані інженерно-технічні заходи сприяють не лише економічній, але й соціальній ефективності експлуатації вантажопідіймального устаткування.

Таким чином, комплексна оцінка ефективності показує, що впровадження запропонованих інженерно-технічних заходів забезпечує суттєве підвищення надійності вантажопідіймального маніпуляторного устаткування за рахунок збільшення міцності та довговічності металоконструкцій, зниження інтенсивності відмов гідроприводів і з'єднань та покращення експлуатаційних показників у цілому (табл. 3.5). Отримані результати підтверджують доцільність практичного застосування розроблених рішень у системах інтенсивної експлуатації та створюють обґрунтовану основу для рекомендацій щодо їх упровадження в умовах реальних виробничо-логістичних об'єктів.

Таблиця 3.5 – Узагальнена порівняльна оцінка ефективності інженерно-технічних заходів щодо підвищення надійності вантажопідіймального устаткування

№	Показник	Одиниця виміру	До впровадження заходів	Після впровадження заходів	Характер впливу
1	2	3	4	5	6
1	Максимальні локальні напруження в стрілі	МПа	500-580	350-400	зменшення на 15-25%
2	Коефіцієнт запасу міцності за текучістю	-	0,9-1,3	1,4-2,3	стабільний запас
3	Амплітуда циклічних напружень	МПа	250-300	160-200	зниження
4	Розрахункова втомна довговічність	цикли	$(0,5-1,0) \cdot 10^5$	$(3,0-6,0) \cdot 10^5$	зростання у 4-7 разів
5	Інтенсивність відмов гідроприводу	л/год	$1.0 \cdot 10^{14}$	$(3-5) 10^{15}$	зменшення у 2-3 рази
6	Середнє напрацювання до відмови	год	8 000-10 000	15 000-20 000	підвищення
7	Частота ремонтних втручань	разів/рік	6-8	2-3	скорочення

Продовження табл. 3.5

8	Коефіцієнт технічної готовності	-	0,88-0,90	0,94-0,96	підвищення
9	Рівень динамічних навантажень	відн. од.	1,0	0,7-0,8	зниження
10	Загальна експлуатаційна надійність	якісна оцінка	задовільна	висока	1 покращення

Узагальнені дані, наведені в таблиці 3.5, підтверджують, що впровадження комплексу інженерно-технічних заходів забезпечує системне підвищення надійності вантажопідіймального устаткування. Досягнутий ефект проявляється у зниженні напружено-деформованого стану металоконструкцій, кратному зростанні втомної довговічності, зменшенні інтенсивності відмов гідроприводів і підвищенні коефіцієнта технічної готовності, що в сукупності обґрунтовує доцільність практичного впровадження запропонованих рішень в умовах інтенсивної експлуатації.

3.6 Охорона праці, навколишнього середовища та безпека в надзвичайних ситуаціях

Експлуатація вантажопідіймального устаткування маніпуляторного типу в умовах інтенсивної роботи супроводжується підвищеним рівнем виробничих ризиків, пов'язаних із дією значних динамічних навантажень, рухомими вантажами, високим тиском у гідросистемі та впливом шуму й вібрацій [13]. У зв'язку з цим питання охорони праці, екологічної безпеки та дій у надзвичайних ситуаціях повинні розглядатися як невід'ємна складова комплексу інженерно-технічних заходів, спрямованих на підвищення надійності вантажопідіймального устаткування.

Забезпечення охорони праці під час експлуатації маніпуляторів передбачає зниження ймовірності травмування персоналу за рахунок конструктивних, організаційних і технічних рішень. Зменшення рівня напружень у металоконструкціях і стабілізація роботи гідроприводу, обґрунтовані в попередніх підрозділах, безпосередньо сприяють підвищенню безпеки, оскільки знижують ризик раптових відмов, неконтрольованих рухів стріли та падіння вантажу. Важливу роль відіграє також застосування захисних кожухів, обмежувачів руху, запобіжних клапанів і систем аварійного відключення, які мінімізують наслідки помилок оператора або нештатних режимів роботи.

Організаційні заходи з охорони праці включають регламентування режимів експлуатації маніпуляторного устаткування, навчання та інструктаж персоналу, а також періодичний контроль технічного стану основних вузлів. Дотримання встановлених допустимих вантажних характеристик і радіусів вильоту, визначених на основі розрахункового обґрунтування, дозволяє уникнути перевантажень і зменшити імовірність аварійних ситуацій. Особливу увагу слід приділяти контролю стану гідросистеми та з'єднань, оскільки витіки робочої рідини та зношування шарнірів можуть призводити не лише до відмов, але й до небезпечних для персоналу ситуацій.

Екологічна безпека при експлуатації вантажопідіймального устаткування пов'язана насамперед із впливом гідравлічних рідин, шуму та вібрацій на навколишнє середовище. Застосування герметизованих гідросистем, високоякісних ущільнювальних елементів і регулярний контроль їхнього стану дозволяє мінімізувати ризик витоків робочої рідини та забруднення ґрунту й водних ресурсів. Оптимізація режимів роботи маніпулятора і зниження динамічних навантажень сприяють зменшенню рівня шуму та вібрацій, що є важливим чинником як для умов праці персоналу, так і для екологічної складової виробничого процесу.

У контексті безпеки в надзвичайних ситуаціях особливого значення набуває готовність устаткування та персоналу до дій у разі відмов гідроприводу,

втрати стійкості вантажу, пошкодження металоконструкцій або аварійних витоків робочої рідини. Інженерно-технічні заходи, спрямовані на підвищення надійності, зменшують імовірність таких подій, проте не виключають їх повністю. Тому необхідним є впровадження чітко визначених алгоритмів аварійного зупинення маніпулятора, швидкого розвантаження гідросистеми та евакуації персоналу із зони потенційної небезпеки.

Комплексний підхід до охорони праці, екологічної безпеки та дій у надзвичайних ситуаціях дозволяє розглядати підвищення надійності вантажопідіймального устаткування не лише як технічне, але й як соціально та екологічно значуще завдання. Реалізація запропонованих у роботі інженерно-технічних заходів сприяє зниженню виробничих ризиків, мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище та підвищенню рівня безпеки експлуатації маніпуляторного устаткування в умовах інтенсивної роботи.

ВИСНОВКИ

1. Аналіз умов інтенсивної експлуатації вантажопідіймального устаткування маніпуляторного типу показав, що зростання робочих швидкостей, радіусів вильоту та циклічності навантажень призводить до істотного підвищення напружено-деформованого стану металоконструкцій, динамічних навантажень у гідроприводах і прискореного зношування вузлів з'єднання, що зумовлює необхідність комплексного підходу до підвищення надійності такого устаткування.

2. Встановлено, що традиційна орієнтація лише на забезпечення статичної міцності або застосування сталей підвищеної міцності без урахування концентрацій напружень і реальних навантажувальних режимів не забезпечує достатнього рівня довговічності маніпуляторів в умовах інтенсивної експлуатації, особливо при великих радіусах вильоту.

3. На основі теоретичних положень теорії надійності, аналізу кінематичних і силових особливостей роботи маніпуляторів та формування розрахункових схем отримано функціональні залежності між експлуатаційними навантаженнями, напруженнями та показниками надійності, що дозволяють виконувати кількісне прогнозування ресурсу основних елементів устаткування.

4. Розрахункове обґрунтування показало, що оптимізація геометрії металоконструкцій стріли, збільшення моменту опору перерізів і зменшення концентрацій напружень забезпечують зниження максимальних локальних напружень у середньому на 15-25%, що створює стійкий запас міцності за текучістю у всьому робочому діапазоні вильоту.

5. Оцінювання втомної міцності та довговічності металоконструкцій підтвердило нелінійний характер впливу амплітуди циклічних напружень на ресурс: зменшення напружень за рахунок конструктивних удосконалень забезпечує кратне (приблизно у 4-7 разів) зростання розрахункової втомної

довговічності порівняно з вихідним варіантом конструкції.

6. Розроблені інженерно-технічні заходи щодо підвищення надійності гідроприводів і з'єднань, спрямовані на зниження динамічних перевантажень, стабілізацію гідравлічного та температурного режимів, підвищення чистоти робочої рідини та довговічності шарнірних вузлів, дозволяють зменшити інтенсивність відмов і збільшити середнє напрацювання до відмови гідросистеми.

7. Комплексна порівняльна оцінка показників надійності до і після впровадження запропонованих заходів засвідчила підвищення коефіцієнта технічної готовності вантажопідіймального устаткування, скорочення частоти ремонтних втручань і зменшення експлуатаційних простоїв, що забезпечує позитивний техніко-економічний ефект в умовах інтенсивної експлуатації.

8. Реалізація розроблених інженерно-технічних рішень сприяє не лише підвищенню надійності та довговічності вантажопідіймального маніпуляторного устаткування, але й підвищенню рівня виробничої та екологічної безпеки, що підтверджує доцільність практичного впровадження отриманих результатів у складських, виробничо-логістичних та інших системах з високою інтенсивністю вантажообігу.

9. Практична реалізація результатів виконаної роботи можлива шляхом впровадження запропонованих конструктивних удосконалень металоконструкцій, оптимізованих режимів роботи гідроприводів і регламентів технічного обслуговування в процесі модернізації наявних або проєктування нових вантажопідіймальних маніпуляторів, що дозволяє підвищити їхню надійність без істотного ускладнення конструкції та забезпечує адаптацію устаткування до умов інтенсивної експлуатації з урахуванням вимог безпеки та економічної доцільності.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Бакай Б. Я., Рудько І. М., Удовицький О. М. Ресурсоефективне устаткування лісопромислового виробництва. Монографія. – Академія технічних наук України, Національний лісотехнічний університет України. – Івано-Франківськ : Видавець Кушнір Г. М. – 2025. – 136 с. – ISBN 978-617-7926-77-0. – DOI: 10.63048/978-617-7926-77-0.
2. Невлюдов І. Ш., Андрусевич А. О., Євсєєв В. В., Новоселов С. П., Демська Н. П. Проектування мобільних маніпуляційних роботів: монографія. Харків, 2022. 427 с.
3. Ловейкін В. С., Міщук Д. О. Оптимізація режиму зміни вильоту маніпулятора з гідроприводом: монографія. Київ : Компрінт, 2013. 205 с.
4. Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О., Сподоба О. О. Оптимізація режимів руху крана-маніпулятора з гідроприводом: монографія. Київ : Ямчинський О. В., 2021. 262 с.
5. La Hera P.X., Ortíz Morales D. What do we observe when we equip a forestry crane with motion sensors? Croatian Journal of Forest Engineering. 2019. Vol. 40, No. 2. P. 259-280. DOI: 10.5552/crojfe.2019.501.
6. Kacalak W., Budniak Z., Majewski M. Crane stability assessment method in the operating cycle. Transport Problems. 2017. Vol. 12, Issue 4. P. 141-151. DOI: 10.20858/tp.2017.12.4.14.
7. La Hera P., Ur Rehman B., Ortíz Morales D. Electro-hydraulically actuated forestry manipulator: modeling and identification. In 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (Vilamoura-Algarve, Portugal). 2012. P. 3399-3404. DOI: 10.1109/IROS.2012.6385656.
8. Невлюдов, І. Ш., Андрусевич, А. О., Євсєєв, В. В., Новоселов, С. П., Демська, Н. П. Проектування мобільних маніпуляційних роботів : Монографія. – Харків : – 2022. – 427 с.
9. Hirai, S., Seto, F., Yokoi, K. Special Issue on Strategic Development of Advanced Robotics Elemental Technologies. Journal of Robotics and

Mechatronics, 2011, Vol. 23, No. 6, pp. 906. DOI: 10.20965/jrm.2011. p0906.

10. Schmierer, G., Schraft, R. Service Robots. – Natick, MA: A. K. Peters. – 2000. – 300 p. ISBN 978-1-56881-089-3.

11. Tsai, L.W. Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators. – New York: Wiley. – 1999. – 502 p. ISBN 978-0-471-32593-6.

12. Kavraki, L., Svestka, P., Latombe, J. C., Overmars, M. Probabilistic Roadmaps for Path Planning in High-Dimensional Configuration Spaces. IEEE Transactions on Robotics and Automation. – 1996. – Vol. 12, №4. – P. 566-580,

13. Основи охорони праці: Підручник. 21ге видання, доповнене та перероблене. / К. Н. Ткачук, М. О. Халімовський, В. В. Зацарний, Д. В. Зеркалов, Р. В. Сабарно, О. І. Полукаров, В. С. Коз'яков, Л. О. Мітюк. За ред. К. Н. Ткачука і М. О. Халімовського. – К. : Основа. – 2006. – 448 с.

ДОДАТКИ

Додаток А

Таблиця А.1 – Вихідні дані для числового обґрунтування (сценарій інтенсивної експлуатації)

Параметр	Позначення	Значення	Примітка
Маса вантажу	m	2000 кг	розрахунковий сценарій
Прискорення вільного падіння	g	9,81м/с ²	прийнято стандартно
Коефіцієнт динамічності	φ_d	1,25	інтенсивні пуски/ гальмування
Радіус вильоту	l	5,0 м	за твоєю умовою
Сталь стріли	–	Strenx 700	Re≥700 МПа
Межа міцності для Гудмана	φ_b	750 МПа	консервативно (мінімум)
Переріз стріли (вихідний)	–	RHS 200 × 150 × × 8 мм	замкнений прямокутний профіль
Переріз стріли (удосконалений)	–	RHS 200 × 160 × × 8 мм	збільшено момент опору
Коеф. концентрації (вихідний)	$k_{\sigma,0}$	1,5	локальні концентратори
Коеф. концентрації (удосконал.)	$k_{\sigma,1}$	1,2	згладження/підсилення вузла
Характер циклу	–	0 → σ_{max}	пульсуючий цикл: $\sigma_a = \sigma_m = \sigma_{max}/2$
Показник кривої втоми (Basquin)	m	3	інженерно прийнято для порівняння
Опорна точка для калібрування	$N_{ref}, \sigma_{a,ref}$	$N_{ref}=2 \cdot 10^6$ циклів, $\sigma_{a,ref}=160$ МПа	для відносної оцінки ресурсу

Додаток Б

Таблиця Б.1 – Розрахунок силових параметрів і напружень при $l=5,0$ м

Показник	Формула	Вихідний варіант	Удосконалений варіант
Вага вантажу	$Q=mg$	$2000 \times 9,81 =$ $=19620$ Н	те саме
Розрахункове навантаження	$Q_r = \varphi_d \cdot Q$	$1,25 \times 19620 = 24525$ Н	те саме
Згинальний момент	$M = Q_r l$	$24525 \times 5,0 = 122625$ Н·м	те саме
Момент опору перерізу	W	$W_0 = 304372$ мм ³	$W_1 = 364522$ мм ³
Номінальне напруження згину	$\sigma = \frac{M}{W}$	$\sigma_0 = 402,9$ МПа	$\sigma_1 = 336,4$ МПа
Зниження номінальних напружень	$\Delta\sigma = \frac{\sigma_0 - \sigma_1}{\sigma_0}$	16,5%	
Локальне максимальне напруження	$\sigma_{\max} = k_0 \cdot \sigma$	$1,5 \cdot 402,9 =$ $=604,3$ МПа	$1,2 \times 336,4 = 403,7$ МПа
Перевірка пружної роботи	$\sigma_{\max} < Re)$	$604,3 < 700$	$403,7 < 700$

Додаток В

Таблиця В.1 – Оцінювання втомної довговічності (з урахуванням середніх напружень)

Показник	Формула	Вихідний варіант	Удосконалений варіант
Амплітуда та середнє $0 \rightarrow \sigma_{\max}$	$\sigma_a = \sigma_m = \sigma_{\max}/2$	302,2 МПа	201,8 МПа
Приведена амплітуда (Гудман)	$\sigma_{a, \text{пр}} = \frac{\sigma_a}{1 - \sigma_m / \sigma_B}$	506,0 МПа	276,2 МПа
Калібрування Basquin	$C = N_{\text{ref}} \sigma_{a, \text{ref}}^m$	$C = 2 \cdot 10^6 \cdot 160^3$	–
Ресурс за Basquin	$N = C / \sigma_{a, \text{пр}}^m$	$N_0 = 6,32 \cdot 10^4$ циклів	$N_1 = 3,89 \cdot 10^5$ циклів
Приріст ресурсу	N_1/N_0	6,15 рази	–