

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»
Кафедра машинобудування, транспорту і зварювання

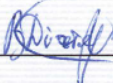
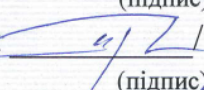
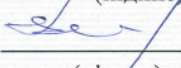
КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра на тему


Професійна підготовка фахівців транспортної галузі з імітаційного моделювання робочих процесів механізму пересування мостового крана

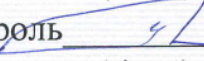
(тема кваліфікаційної роботи)

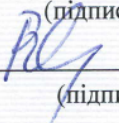
Виконав: студент 2 курсу, групи ДІТ- ПОТр-23мг
спеціальності: 015 Професійна освіта (Транспорт)
(код і найменування спеціальності)

	/	<u>Валерій ДІГТЯР</u>
(підпис)		(ім'я та прізвище)
Керівник 	/	<u>Олег ПОДОЛЯК</u>
(підпис)		(ім'я та прізвище)
Рецензент 	/	<u>Павло Васюченко</u>
(підпис)		(ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри  / Олег ПОДОЛЯК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Нормоконтроль  / Олег ПОДОЛЯК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Секретар ЕК  / Валентина СКОРШІНА
(підпис) (ім'я та прізвище)

Харків – 2024 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В. Н.
КАРАЗІНА

Факультет Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»

Кафедра машинобудування, транспорту і зварювання

Спеціальність 015 Професійна освіта. (Транспорт)

Освітньо-професійна програма Професійна освіта. (Транспорт)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри


(підпис)

к.т.н., доц. Олег ПОДОЛЯК

«12» 10 2024р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу (дипломну роботу/дипломний проєкт)
другого (магістерського) рівня вищої освіти

студенту (ці)

Валерію ДІГТЯРУ
(ім'я, прізвище)

1. Тема **Професійна підготовка фахівців транспортної галузі з імітаційного моделювання робочих процесів механізму пересування мостового крана**

затверджена наказом по академії № 4801-5/3395 від «12» 10 2024 р.

2. Термін здачі закінченої роботи « 10 » грудня 2024 р.

Мостовий кран вантажопідйомністю 20/5 т прогін 22,5 м.

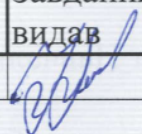
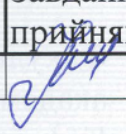
4. Зміст роботи/проєкту (перелік питань, що їх належить розробити):

Вступ. 1. Аналіз стану питання. 2. Розрахункова схема і рівняння руху. 3. Розрахунок і дослідження динамічних навантажень. 4. Методичний розділ. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал):

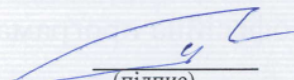
Презентація основних результатів виконаних досліджень. Роздатковий матеріал

6. Консультант:

Розділ	Консультант	Підпис, дата		Оцінка (бали)
		Завдання видав	Завдання прийняв	
Методичний	Наталія КОРОЛЬОВА			

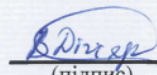
7. Дата видачі завдання «02»__вересня_2024р.

Керівник роботи


(підпис)

Олег ПОДОЛЯК
(ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання

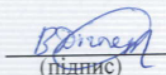

(підпис)

Валерій ДІГТЯР
(ім'я, прізвище)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК
виконання кваліфікаційної роботи
(дипломної роботи/дипломного проєкту)


№ з/п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1.	Аналіз стану питання.	1.10.2024	
2.	Побудова розрахункової схеми і рівняння руху.	10.10.2024	
3.	Розрахунок і дослідження динамічних навантажень.	10.11.2024	
4.	Методичний розділ.	30.11.2024	
5.	Оформлення і захист дипломного проєкту	5.12.2024	

Студент (ка)


(підпис)

Валерій ДІГТЯР
(ім'я, прізвище)

Нормоконтроль


(підпис)

Олег ПОДОЛЯК
(ім'я, прізвище)

Додаток 2 до Порядку проведення перевірки наукових праць, навчально-методичних видань та дипломних робіт (проектів) працівників та здобувачів вищої освіти на наявність запозичень з інших документів (нова редакція)

Введено в дію:

наказ ректора № 0204 -1/088 від 27.02.2020 р.

Протокол контролю оригінальності дипломної роботи (проекту)

Професійна підготовка фахівців транспортної галузі з імітаційного моделювання робочих процесів механізму пересування мостового крана

(назва роботи)

студента

ДІГТЯР Валерій Сергійович

(прізвище, ім'я та по батькові)

науковий керівник

Подоляк Олег Степанович

(прізвище, ім'я та по батькові)

В результаті перевірки роботи в антиплагіатній інтернет-системі Strikeplagiarism.com встановлено наступні значення Коефіцієнтів Подібності

Коефіцієнт Подібності 1: 10,88,

Коефіцієнт Подібності 2: 5,13 ,

Сигнал „Тривога!?”: – немає; – є, кількість разів у тексті ____.

Вченою радою факультету (навчально-наукового інституту) затверджено наступні показники оригінальності (за значенням коефіцієнту К1):

не більше 20% – оригінальна робота,

від 21% до 50% – задовільно оригінальна робота,

від 51% до 90% – умовно оригінальна робота,

більше 90% – неоригінальна робота.

Відповідно до цього, робота може бути класифікована як:

оригінальна,

задовільно оригінальна,

умовно оригінальна,

неоригінальна.

Висновок:

робота може бути допущена до захисту,

необхідно провести розгляд Повного Звіту Подібності із залученням фахівців із тематики дипломної роботи (проекту).

Примітки Системного Оператора про виявлені запозичення:

Системний Оператор



Скоркін А.О.

(прізвище та ініціали)

28.11.2024

(дата)

Реферат

Пояснювальна записка містить сторінок 72, таблиць 8, рисунків 14, використуваних літературних джерел 24.

Професійна підготовка фахівців транспортної галузі з імітаційного моделювання робочих процесів механізму пересування мостового крана

Об'єктом дослідження є процес професійної підготовки фахівців транспортної галузі в закладах вищої освіти

Предмет дослідження – професійна підготовка фахівців транспортної галузі з імітаційного моделювання робочих процесів механізму пересування мостового крана.

Метою дослідження є визначити, описати, теоретично обґрунтувати та проаналізувати процес професійної підготовки фахівців транспортної галузі, розробити дидактичний проєкт факультативного заняття з теми «Імітаційне моделювання робочих процесів механізму пересування мостового крана».

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі *завдання*:

1. Сформулювати критерій ефективності процесу пересування вантажного візка в просторі конфігурацій мостового крана.
2. Виявити загальні залежності формування основних параметрів механізму пересування мостового крана.
3. Розробити та впровадити методику вибору основних параметрів механізму пересування і запропонувати технічні рішення з інженерної реалізації перспективних конструкцій мостового крана.

Наукова новизна роботи

Наукова новизна полягає в тому, що удосконалено професійну підготовку фахівців транспортної галузі з імітаційного моделювання робочих процесів механізму пересування мостового крана.

A report

The Explanation message contains pages 72, of tables 8, of pictures 14, of the used literary sources 24.

Professional training of specialists in the transport industry on simulation modeling of work processes of the movement mechanism of a bridge crane

The object of the study is the process of professional training of transport industry specialists in higher education institutions

The subject of the study is the professional training of specialists in the transport industry in simulation modeling of the work processes of the bridge crane movement mechanism

The purpose of the study is to define, describe, theoretically substantiate and analyze the process of professional training of transport industry specialists, to develop a didactic project of an optional lesson on the topic "Simulation modeling of working processes of the movement mechanism of a bridge crane".

To achieve the goal, the following tasks must be solved:

1. Formulate a criterion for the efficiency of the process of moving a cargo trolley in the space of overhead crane configurations.
2. Identify the general dependencies of the formation of the main parameters of the bridge crane movement mechanism.
3. Develop and implement a methodology for selecting the main parameters of the movement mechanism and propose technical solutions for the engineering implementation of promising bridge crane designs.

Scientific novelty of work

The scientific novelty is that the professional training of specialists in the transport industry has been improved in simulating the work processes of the bridge crane movement mechanism.

ЗМІСТ

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	
СПИСОК СКОРОЧЕНЬ	
ВСТУП.....	9
1. АКТУАЛЬНІСТЬ ПРОФЕСІЙНОЇ ПІДГОТОВКИ ФАХІВЦІВ ТРАНСПОРТНОЇ ГАЛУЗІ.....	11
1.1 Сучасні проблеми в транспортній галузі.....	11
1.2 Особливості професійної підготовки фахівців транспортної галузі	12
Висновки до розділу 1	16
2 ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ. СТРУКТУРА РОБОТИ	17
2.1 Загальна методика дослідження	17
2.2 Методика теоретичних досліджень	18
2.3 Методика експериментальних досліджень і обробки експериментальних даних	20
2.4 Структура роботи	25
Висновки до розділу 2.....	27
3 РОЗРОБКА МОДЕЛІ СКЛАДНОЇ ДИНАМІЧНОЇ СИСТЕМИ МОСТОВОГО КРАНА	28
3.1 Вибір і обґрунтування розрахункової схеми мостового крана.....	28
3.2 Рівняння руху механічної підсистеми мостового крана.....	31
3.3 Імітаційна модель механічної підсистеми мостового крана.....	45
Висновки до розділу 3	55
4. РОЗРОБКА ДИДАКТИЧНОГО ПРОЄКТУ ФАКУЛЬТАТИВНОГО ЗАНЯТТЯ З ТЕМИ «ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ МЕХАНІЗМУ ПЕРЕСУВАННЯ МОСТОВОГО КРАНА».....	56
4.1 Постановка цілей факультативного заняття.....	56
4.2 Перелік літературних джерел з теми.....	57
4.3 Конструювання дидактичних матеріалів: аналіз структури навчального матеріалу факультативного заняття.....	58
4.4 Аналіз опорних умов навчання.....	61
4.5 Проектування мотиваційних технологій навчання.....	62
4.6 Проектування технології формування орієнтовної основи діяльності на фа- культативному занятті.....	63
4.7 Проектування технології формування виконавчих дій на факультативному занятті.....	64
4.8 Проектування контрольних дій з теми.....	65
4.9 Розробка сценарію факультативного заняття.....	66
Висновки до розділу 4	69
ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ.....	71
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	72

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

B – база крана;

k – колія візка;

L – проліт крана;

F_K – вертикальне навантаження від колеса крана на рейку;

Q – вантажопідйомність крана;

σ_{max} – максимальне розрахункове напруження в конструкції;

D_{max} – діаметр ходового колеса;

$d_{ц}$ – діаметр цапфи (осі) ходового колеса;

H – максимальна висота підйому вантажу;

m_B – маса вантажного візка;

m_K – маса крана;

m_T – маса вантажу, що піднімається;

$N_{дв}$ – потужність електродвигуна;

N_c – статична потужність двигуна;

$F_{пер}$ – загальна сила опору пересуванню;

V_0 – швидкість вала двигуна при холостому ході;

f_L – прогин або вертикальне переміщення елемента конструкції;

l – відстань від вантажного візка до одного з тупикових упорів;

F_B – сила опору від вітрового навантаження;

$F_{Тр}$ – сила опору від сил тертя;

$F_{ухил}$ – сила опору від ухилу шляху;

V_K – швидкість пересування крана;

V_B – швидкість пересування візка;

V_T – швидкість підйому (опускання) вантажу;

$n_{дв}$ – частота обертання двигуна;

$n_{хк}$ – частота обертання ходового колеса.

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

ВПМ	вантажопідйомна машина
ККД	коефіцієнт корисної дії
МКЕ	метод кінцевих елементів
МЦХ	масово-інерційна характеристика
ПДВ	напружено-деформований стан
ПК	персональний комп'ютер
ПТМ	підйомно-транспортна машина
ПФЕ	повний факторний експеримент
САПР	система автоматизованого проектування
ТЗ	технічне завдання
ЕОМ	електронно-обчислювальна машина

ВСТУП

В теперішній час без великих вантажопідйомних машин неможливим був би прогрес у сучасному суспільстві, а особливо у будівництві. А без людей, що ними керують, не працювали б і самі машини. Машиніст крану – це людина, що керує роботою підйомного крану. У народі таких спеціалістів називають кранівниками. Машиністи крана поділяються по спеціалізації в залежності від типу самої машини.

На сучасному промисловому підприємстві вантажопідйомні крани є основним видом технологічного устаткування, від нормальної експлуатації яких багато в чому залежить робота підприємства в цілому, а саме – своєчасне і якісне виконання технологічних процесів, висока якість продукції, що випускається.

На сьогоднішній час в нашій країні необхідно негайно удосконалювати професійну підготовку кваліфікованих кадрів. Цей обумовило актуальність обраної теми.

Високий рівень розвитку сучасних технологій веде до витіснення з процесу виробництва низько кваліфікованих фахівців та носіїв застарілих професій, викликає необхідність найму адаптованого до вимог сучасних технологій фахівців, який досить гнучко реагує на професійні зміни.

Найголовнішим є професійна підготовка фахівців транспортної галузі.

Об'єктом дослідження є процес професійної підготовки фахівців транспортної галузі в закладах вищої освіти

Предмет дослідження – професійна підготовка фахівців транспортної галузі з імітаційного моделювання робочих процесів механізму пересування мостового крана.

Метою дослідження є визначити, описати, теоретично обґрунтувати та проаналізувати процес професійної підготовки фахівців транспортної галузі, розробити дидактичний проєкт факультативного заняття з теми «Імітаційне моделювання робочих процесів механізму пересування мостового крана».

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати актуальність професійної підготовки фахівців транспортної галузі.

2. Теоретично обґрунтувати, розробити дидактичний проєкт факультативного заняття з теми «Імітаційне моделювання робочих процесів механізму пересування мостового крана».

Для досягнення мети, розв'язання визначених завдань використано комплекс сучасних загальнонаукових і спеціальних методів:

- аналіз – методологічна основа дослідження, яка спирається на аналіз, покликана розкласти предмет або явище, що описується на ознаки і властивості, щоб вивчити його більш конкретно; синтез – поєднує окремі елементи (властивості, ознаки) в єдине ціле для детальнішого вивчення; моделювання – з метою більш успішного моделювання ситуацій та отримання результатів, які важко було б досягти насправді; дедукція – дозволяє зробити висновки про певні явища та предмети, ґрунтуючись на загальних даних. Тут діє принцип від загального до часткового; узагальнення - робиться загальний висновок про предмети або явища на основі багатьох дрібних ознак; формалізація – суть методу формалізації – передати структуру чи сутність явища (об'єкта) через знакову модель, використовуючи при цьому математичні схеми, формули чи символи; конкретизація – детальне вивчення об'єкта або явища в реально існуючих умовах.

Наукова новизна полягає в тому, що удосконалено професійну підготовку фахівців транспортної галузі з імітаційного моделювання робочих процесів механізму пересування мостового крана.

Практична цінність роботи полягає в тому, що було розроблено дидактичний проєкт факультативного заняття з теми «Імітаційне моделювання робочих процесів механізму пересування мостового крана».

Структура та загальний обсяг роботи. Робота складається з української та англійської анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел.

РОЗДІЛ 1

АКТУАЛЬНІСТЬ ПРОФЕСІЙНОЇ ПІДГОТОВКИ ФАХІВЦІВ ТРАНСПОРТНОЇ ГАЛУЗІ

1.1. Сучасні проблеми в транспортній галузі

Проблема ризиків на автомобільному транспорті вивчена недостатньо глибоко, оскільки має місце розрізненість наукових поглядів на методи управління ризиками (транспортними, економічними, технологічними, виробничими, операційними та ін.) автотранспортних підприємств, існуючий інструментарій не дозволяє повністю охопити проблему управління цими ризиками.

Оптимальне керування діяльністю автотранспортних підприємств з ефективним використанням ринкових та внутрішньогосподарських можливостей вимагає поглибленого дослідження ризиків на автомобільному транспорті та розробки сучасних методів управління ними.

Головним завданням управління ризиком є забезпечення такого положення підприємства на ринку, щоб воно не опинилося в кризовій ситуації, а змогло подолати тимчасові труднощі у вигляді використання всіх можливостей сучасного менеджменту, розробки та практичної реалізації на кожному підприємстві спеціальної програми, має стратегічний характер.

Стратегія управління ризиком - довгострокові принципи та правила управління ризиком в організації, засновані на прогнозуванні ризикових ситуацій та використання різних методів управління ризиками.

Ризик - це можливість небезпеки, невдачі та придбань, виграшу у передбаченні результату. Ризик як елемент господарського рішення може бути визначений в такий спосіб - це ситуативна характеристика діяльності будь-якого суб'єкта ринкових відносин, у тому числі підприємства, відображає невизначеність її результату та можливі несприятливі (або, навпаки, сприятливі) наслідки у разі неуспіху (чи успіху).

Як правило, ризик оцінюють у виробничій, управлінській, інвестиційній, економічній та ринкової діяльності. Таким чином, управлінський ризик є частиною ширшого набору ризиків.

Управлінський ризик розглядається по всьому ланцюжку розробки та реалізації управління ризиками. Ризик визначає співвідношення двох полярних результатів: негативного (повний зрив запланованого) та позитивного (досягнення запланованого).

Управління ризиками стало необхідним у системах та процедурах управління підприємств, незалежно від сфери їхньої діяльності.

Управлінські ризики становлять частину загальних ризиків підприємств. Вони являють собою набір бажаних або небажаних викликаних управлінськими рішеннями ситуацій, які можуть виникнути або за реалізації рішень, чи згодом.

Управлінські ризики включають організаційні, економічні, технологічні, соціальні, правові, кадрові та інші ризики.

Організаційні ризики пов'язані з рішеннями щодо вибору форми та місця розташування організації при її реєстрації, побудові структури організації, розподілу прав, обов'язків та відповідальності серед персоналу.

Економічні ризики - ризик втрат, пов'язаний із помилками у процесах проведення операцій із планування послуг та інших видів виробничої діяльності та розрахунків за ними, їх обліку, звітності, ціноутворення, планування та складання бюджету тощо.

1.2. Особливості професійної підготовки фахівців транспортної галузі

В управлінні автотранспортом структура бізнес-процесів – це складна система взаємодія між персоналом, усіма підрозділами підприємства та контрагентами з сервісу, палива, страхування тощо.

Бізнес-процеси включають безліч процедур – це вибір марки та моделі автомобіля під завдання підприємства, управління автотранспортом, планування, складання бюджету, оновлення автопарку, взаємодії із постачальниками.

Бізнес-процеси мають бути максимально ефективними.

Оргструктура підприємства повинна відповідати бізнес-процесам, які бажано, як мінімум, детально та покроково описувати в Положення підприємства. І найважливішою складовою є ефективне взаємодія між такими підрозділами, як керівництво, та різні відділи (виробничий відділ, бухгалтерія, юридичний відділ, відділ кадрів, відділ маркетингу тощо). Контроль за досягненням цілей, поставлених у процесі планування діяльності підприємства, передбачає порівняння та аналіз усіх показників, що характеризують його фінансово-економічну діяльність.

Технологічні ризики - ризик втрат, зумовлених недосконалістю вибраних і використовуваних технологій управління, тобто. Недостатньою ємністю систем, їх неадекватністю операціям, що проводяться, грубості методів обробки даних або низької якості чи неадекватності використовуваних даних тощо. буд.

Інформаційні технічні системи керування автотранспортом це один з основних та ефективних інструментів управління та контролю автотранспорту, планування та складання бюджету, взаємодії з постачальниками тощо.

Технічні та ІТ засоби управління та безпеки на автотранспорті – це цілий комплекс керування автотранспортом та який складається з наступних модулів: модуль диспетчеризації, модуль обліку перевезень, модуль обліку роботи водіїв, модуль складського обліку, модуль обліку ПММ, модуль управління ремонтами та плановим технічним обслуговуванням, модуль у запозичень, модуль обліку витрат, модуль планування, модуль CRM, модуль міжнародних перевезень, модуль інтеграції з GPS. Також ІТ системи є базою знань з нормативів та законодавству.

Соціальні ризики пов'язані з вибором та реалізацією методик впливу на персонал при індивідуальному та колективному підході.

Правові ризики пов'язані з вибором та реалізацією базових для підприємства законодавчих актів та положень, форм контрактів та співробітництва, закордонних партнерів.

Також серед управлінських ризиків виділяють ризик персоналу та ризики середовища.

Ризик персоналу - ризик втрат, пов'язаний із можливими помилками працівників, недостатньою кваліфікацією, зовнішнім та внутрішнім шахрайством, нестійкістю штату організації, можливістю несприятливих змін у трудовому законодавстві, нестача кадрів та і т.д.

Професійний рівень співробітника важливий на кожній посаді, кожен фахівець є ланкою одного ланцюга управління автотранспортом та не важливо, це водій, диспетчер, механік, лікар, інженер з БДД або керуючий автотранспортом. Сьогодні не готують 100%-х управлінців автотранспортом, які б відповідали за ефективність управління.

Оптимальне рішення – ефективна підготовка кадрів з урахуванням високої професійної підготовки, мотивування самоосвіти та підвищення кваліфікації працівників усіма доступними методами.

Сучасні системи автотранспорту вимагають відповідного, досить високого, рівня підготовки управлінців та підлеглого їм персоналу.

Керуючий автотранспортом повинен мати знання та досвід у сферах автотранспорту, законодавства, БДД, страхування, автосервісу та інших сферах.

Ризики середовища - ризики втрат, пов'язані зі змінами в середовищі, в якому діє організація, тобто. змінами у законодавстві, змінами системи оподаткування, політичними змінами тощо. Управління автотранспортом, розрахунок та списання витрат на нього, БДД, тарифікація, та ін. регламентуються значною кількістю законодавчих актів.

Керуючий автотранспортом зобов'язаний керуватися у своїй діяльності законодавства України та постійно відстежувати його зміни.

Через недооцінку або ігнорування ризиків в автотранспортному напрямі підприємства зазнають серйозних фінансових втрат, зокрема, до 30% паливо; до 50% на обслуговування та ремонти; втрати страхового відшкодування при ДТП та інші. На практиці з операційних ризиків фінансові втрати на

автотранспорті сягають 5-50% залежно від статей бюджету та 5-25% від загального річного бюджету на автотранспорт підприємства.

Ефективними інструментами зниження управлінських ризиків та витрат підприємств-власників автотранспорту є транспортний аудит (незалежна економіко-правова експертиза транспортної діяльності) та розробка програм або комплексних заходів щодо наступним напрямом: організаційно-штатна структура та бізнес-процеси управління; управління витратами та ремонтами автотранспорту; заходи щодо зниження аварійності та профілактики ДТП; купівля нового та списання старого автотранспорту; GPS системи безпеки автотранспорту та контролю маршрутів та ІТ рішення управління автотранспортом; наявність підготовлених фахівців у галузі ризик-маркетингу та ризикменеджменту, рекомендації щодо підбору, навчання та підвищення кваліфікації персоналу та ін.

В управлінні доцільно дослідити ризик цілей, визначення способів та засобів їх досягнення (ризик - маркетингу), у менеджменті можуть розглядатися ризики вивчення та дії; ризики планування, організації, мотивації та контролю; ризики таємниці та конфіденційності; ризики управління конфліктом, а також розробка навчальних планів та навчання безпеки керівників та інших співробітників.

Управління ризиками - це система стратегій, методів та прийомів для зменшення можливих негативних наслідків на результати діяльності організації при прийнятті помилкових з різних причин рішень. Ринкові відносини вносять істотний елемент тривоги у діяльність керівників та власників.

Сучасний управлінець на транспорті має бути підготовлений до комплексного підходу в управлінні всіма видами ризику, що виникають у процесі функціонування підприємства. Без правильного прийняття управлінських рішень, ефективного керівництва навряд чи можливо економічне процвітання компанії.

Оптимальне керування діяльністю автотранспортних підприємств з ефективним використанням ринкових та внутрішньогосподарських можливо-

стей потребує поглибленого дослідження різних видів ризиків на автомобільному транспорті та розробки сучасних методів управління ними, що свідчить про необхідність спеціальної підготовки студентів – майбутніх спеціалістів на транспорті до управління різними видами ризиків у процесі професійної підготовки в ЗВО.

Тому, насамперед, необхідні такі педагогічні умови та засоби формування готовності до управління ризиками на транспорті у студентів у процесі професійної підготовки у ЗВО, які б дозволять ефективно підготувати майбутнього фахівця.

Висновки до розділу 1

Таким чином, формування готовності до управління ризиками на транспорті у студентів у процесі професійної підготовки в ЗВО може здійснюватися ефективно, якщо враховуються такі умови у процесі професійної підготовки у ЗВО:

- розгляд готовності до управління ризиками на транспорті як цілі професійної підготовки;
- створення єдиної інформаційно – фактологічної бази у вигляді банку типових ризикових ситуацій транспортного підприємства у процесі вивчення загальнопрофесійних та спеціальних дисциплін;
- визначення змісту навчального матеріалу загальнопрофесійних та спеціальних дисциплін;
- створення навчального матеріалу загальнопрофесійних та спеціальних дисциплін, що відповідають професійним завданням до управління ризиками на транспорті.

2 ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ. СТРУКТУРА РОБОТИ

2.1 Загальна методика дослідження

В дипломній роботі мостовий вантажопідійомний кран розглядається як складна динамічна система, що складається з механізмів і приводів, металоконструкції, що несе, а також будівельної частини будівлі, в якій працює кран. Складність динамічних процесів полягає в тому, що при пересуванні візка по рейковому шляху відбуваються коливання балочної металоконструкції крана, крутильні коливання трансмісії механізму пересування, митників коливання підвішеного на канатах вантажу, а також повільні поперечні і обертальні рухи моста крана, при яких відбувається пружне ковзання ходових коліс візка по рейках.

Складна динамічна система мостового крана змінює свою поведінку в часі під впливом зовнішніх і внутрішніх збурень. Внутрішніми динамічними впливами є сила і момент, що розвиваються двигуном машини. Зовнішніми впливами на металоконструкцію є сила інерції при підйомі вантажу, сили опору підйому і пересування візка. При підйомі вантажу, пересування моста і візка силовий вплив від двигуна або гальма передається на металоконструкцію через систему приводів механізму, жорсткість яких перевищує жорсткість металоконструкції.

Аналіз динамічних процесів в кранах і їх механізмах в загальному вигляді складний, тому що коливальна система крана складається з великого числа мас і пружних елементів, а характер розвитку процесу залежить ще і від початкових умов [16].

В даному дипломному проекті в якості загальної методики досліджень використовувався системний підхід. Саме він є загальноприйнятим напрямком методології наукових досліджень.

Системний підхід передбачає комплексний метод проведення досліджень, що містить як теоретичні, так і експериментальні методи дослідження. В результаті теоретичних досліджень встановлюються закономірності функціону-

вання окремих підсистем і всієї системи в цілому. В роботі теоретичні дослідження проводились методами імітаційного та математичного моделювання. До завдань експериментальних досліджень відносяться: підтвердження адекватності математичної моделі; визначення чисельних значень параметрів, що входять в математичну модель; перевірка працездатності конструкторських розробок; визначення ефективності запропонованих технічних рішень.

Застосування системного підходу спільно з моделюванням дозволяє в доступній для аналізу формі відобразити істотні і цікаві властивості системи, а також використовувати ПК для дослідження поведінки системи в конкретних заданих умовах. Рішення задач з застосуванням методології системного аналізу було проведено у відповідності з наступними етапами [16]:

1. Постановка завдання - визначаються об'єкт і предмет дослідження, мета і завдання, а також критерії для вивчення об'єкта;
2. Аналіз розв'язуваної задачі - визначається структура досліджуваної системи; виділяються окремі складові частини системи і визначаються зв'язку між ними; складається математична модель системи в цілому;
3. Рішення поставленого завдання - досліджується отримана математична модель; визначаються функціональні залежності між параметрами системи.

2.2 Методика теоретичних досліджень

Основу теоретичних досліджень даної роботи становить математичне моделювання, що дозволяє вирішувати завдання проектування мостових кранів, а також дослідити динамічні процеси, що виникають при їх роботі. Теоретичні дослідження ґрунтуються на математичній моделі, яка з достатнім ступенем точності відображає досліджувані властивості об'єкта. Подібні теоретичні дослідження називаються обчислювальним експериментом. Даний спосіб має ряд переваг перед натурними випробуваннями [17]:

- Невисока вартість проведення досліджень;
- Істотне скорочення часових витрат на проведення експерименту;

- Можливість зовнішнього втручання на будь-якому етапі проведення досліджень;
- Можливість моделювання таких умов експерименту, відтворення яких в реальних умовах ускладнене або неможливе.

Проведення теоретичних досліджень складних динамічних систем істотно спрощуються за рахунок використання сучасних засобів обчислювальної техніки. У даній роботі математична модель досліджується як аналітично, так і методами математичного моделювання.

Математичне моделювання динамічної системи здійснюється на ПК шляхом вирішення системи диференціальних рівнянь чисельним методом з використанням програми Maplesoft Maple 9.5 [18]. Імітаційне моделювання системи, тобто моделювання основних динамічних характеристик мостового крана при пересуванні вантажного візка було проведено в програмному продукті SolidWorks із застосуванням пакета SolidWorks Motion. Прикладний модуль SolidWorks Motion, призначений для кінематичного і динамічного аналізу проєктованих механізмів, має такі переваги:

- Модуль використовує інформацію, що міститься в збірках SolidWorks, з можливістю уточнення розрахункової моделі в інтерфейсі SolidWorks Motion;
- Все обчислення виконуються в режимі реального часу;
- У процесі рішення може здійснюватися візуалізація руху моделі;
- Застосування датчиків даних руху дозволяє виконувати оптимізацію параметрів руху механізмів;
- Передача результатів динамічного аналізу - сил в сполученнях і інерційних навантажень - в модуль SolidWorks Simulation для аналізу ПДВ деталей.

З метою подальшого використання результатів динамічного аналізу для розрахунку на міцність несучої металоконструкції мостового крана застосовувався модуль SolidWorks Simulation. Додаток SolidWorks Simulation виконує статичні і динамічні дослідження на міцність (лінійні і нелінійні) на основі

МКЕ. Створення досліджень і виконання розрахунків відбувалося безпосередньо в середовищі програмного комплексу SolidWorks на основі власних моделей SolidWorks, а також деталей і зборок довільній імпортованої геометрії.

Для складання рівнянь руху динамічної розрахункової схеми використовувався метод рівнянь Лагранжа другого роду. Воно застосовується для вирішення широкого кола завдань динаміки, і дозволяє отримати чисельні алгоритми моделювання руху складних систем [19]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial K}{\partial q_j} + \frac{\partial P}{\partial q_j} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_j} = F_j, \quad (j = 1, 2, \dots, l) \quad (2.1)$$

де K – кінетична енергія системи; P – потенційна енергія системи; Φ – дисипативна функція; t – час; q_j – j -ая узагальнена координата переміщення; \dot{q}_j – узагальнена координата швидкості; F_j – узагальнена сила, діюча по j -ой узагальненій координаті.

Математична модель, розроблена на основі даних рівнянь, дозволяє вирішити завдання динаміки, кінематики та статички. Таким чином, була складена система диференціальних рівнянь зі змінними коефіцієнтами, що є математичною моделлю мостового крана для дослідження процесів пересування вантажного візка. Коефіцієнти рівнянь являють собою основні характеристики модельованої динамічної системи, що дає велику наочність при аналізі отриманих результатів.

2.3 Методика експериментальних досліджень і обробки експериментальних даних

Прийнятий в даній роботі комплексний метод досліджень передбачає проведення як теоретичних, так і експериментальних досліджень. Зазвичай процес експериментування включає такі етапи, як постановка задачі, апріорний аналіз, експеримент, інтерпретація результатів [20]. У кожен з цих етапів входить такий необхідний крок, як прийняття рішень.

Однією з умов правомірності висновків, отриманих при дослідженні на математичній моделі, є її здатність відобразити з необхідною точністю харак-

теристики досліджуваного процесу або об'єкта при зміні його параметрів і зовнішніх впливів, тобто адекватність математичної моделі досліджуваного об'єкта.

Процес підтвердження адекватності полягає в наступній послідовності дій:

1. Проведення натурного експерименту з метою отримання масиву експериментальних даних;
2. Проведення машинного експерименту при необхідних параметрах і умовах з метою отримання масиву теоретичних даних;
3. Оцінка адекватності математичної моделі шляхом порівняння експериментальних і теоретичних даних.

При проведенні експериментальних досліджень можливе використання двох методів активного і пасивного експерименту [20].

Пасивний експеримент заснований на реєстрації вхідних і вихідних параметрів, що характеризують об'єкт дослідження, без втручання в експеримент в процесі його проведення. При пасивному експерименті існують тільки чинники у вигляді вхідних контрольованих, але некерованих змінних, і експериментатор знаходиться в положенні пасивного спостерігача. Обробка експериментальних даних здійснюється тільки після закінчення експерименту [20].

Активний експеримент проводиться із застосуванням штучних впливів на об'єкт за спеціальним алгоритмом. Він дозволяє швидко встановлювати закономірності, знаходити оптимальні режими функціонування об'єкта. При цьому у вихідні координатам і перехідним процесам оцінюють властивості об'єкта [20].

В роботі проведення експериментальних досліджень засновано на двох методах - активному і пасивному експериментах.

Для проведення досліджень необхідно було також скласти план експерименту. План експерименту може бути класичним і факторним. Класичний план полягає в зміні одного фактора в усьому інтервалі значень при сталості інших

незалежних факторів. У ПФЕ реалізуються всі можливі поєднання рівнів факторів. У даній роботі використовувалася методика ПФЕ типу 2^k .

Після реалізації експерименту по обраному плану проводилась обробка результатів експерименту. Обробка отриманих даних здійснювалася за допомогою кореляційного і регресійного аналізів.

Оцінка якості регресійних залежностей, отриманих в результаті експериментальних і теоретичних досліджень, проводилася за допомогою наступних показників: коефіцієнта детермінації R^2 ; скоригованого коефіцієнта детермінації; критерію Фішера F ; суми квадратів залишків R_{ss} ; стандартної помилки рівняння регресії S_y . Перевірка статистичної значущості коефіцієнтів регресійного рівняння виконувалась за t -критерієм Стьюдента [22].

Сума квадратів залишків R_{ss} вимірює не пояснену частину варіації залежної змінної:

$$R_{ss} = \sum (y_i - \tilde{y}_i)^2 \quad (2.2)$$

де y_i – значення відгуку; \tilde{y}_i – значення відгуку, обчислене за рівнянням регресії.

Стандартна помилка рівняння регресії вимірює величину квадрата помилки, що припадає на одну ступінь свободи регресійній моделі:

$$S_y = \sqrt{\frac{R_{ss}}{N_{on} - n - 1}} \quad (2.3)$$

де N_{on} – число дослідів; n – число незалежних змінних в рівнянні регресії.

Стандартна помилка рівняння регресії використовується в якості основної величини для вимірювання якості рівняння регресії.

Коефіцієнт детермінації R^2 характеризує, на скільки відсотків побудоване рівняння регресії пояснює варіацію значень залежної змінної щодо свого середнього рівня, тобто показує частку загальної дисперсії результативної змінної y , пояснене варіацією факторних змінних $x_1 \dots x_m$, включених в рівняння регресії. Коефіцієнт детермінації може бути визначений за допомогою теореми про розкладання сум квадратів за формулою:

$$R^2 = 1 - \frac{R_{ss}}{T_{ss}} \quad (2.4)$$

де T_{ss} – повна сума квадратів:

$$T_{ss} = \sum (y_i - \bar{y}_i)^2 \quad (2.5)$$

Чим ближче значення R^2 до одиниці, тим краще рівняння регресії характеризує взаємозв'язок між змінними. Поряд з коефіцієнтом детермінації R^2 розраховувався скоригований коефіцієнт детермінації в якому враховувалася кількість факторних змінних, включених в рівняння регресії.

Скоригований коефіцієнт детермінації показує частку пояснюваної дисперсії з урахуванням числа змінних рівняння регресії:

$$\bar{R}^2 = R^2 - \frac{n}{N_{on} - n - 1} (1 - R^2) \quad (2.6)$$

Скоригований коефіцієнт детермінації не перевищує за величиною коефіцієнт детермінації R^2 . При великому обсязі вибіркової сукупності значення звичайного і скоригованого коефіцієнтів детермінації практично не відрізняються один від одного.

Для перевірки значущості регресійної моделі застосовувався критерій Фішера F :

$$F = \frac{R^2/n}{(1 - R^2)/(N_{on} - n - 1)} \quad (2.7)$$

Спостережуване значення F -критерію (обчислене на основі вибірових даних) порівнювалося зі значенням F -критерію, яке визначалося за таблицями розподілу Фішера. Цей критерій вважається критичним.

При перевірці значимості коефіцієнта детермінації критичне значення F -критерію визначається як функція: $F_{\text{крит}}(a, d.f.1, d.f.2)$ де a – рівень значущості, $d.f.1 = n - 1$, $d.f.2 = N_{on} - n - 1$ – число ступенів свободи.

Якщо $F > F_{\text{крит}}$, то з ймовірністю α основна гіпотеза про не значимість коефіцієнта детермінації відкидається, і він визнається значним, в іншому випадку коефіцієнт детермінації вважається незначним.

При складанні моделі множинної регресії необхідно було виконати перевірку значущості коефіцієнтів рівняння регресії b_i , $i \in [1; p]$. Перевірка проведена за допомогою t -критерію Стюдента, який пов'язаний з приватним F -критерієм Фішера.

При перевірці гіпотези про значущість коефіцієнтів моделі множинної регресії застосовувалася залежність, яка існує між t -критерієм Стюдента і F -критерієм Фішера:

$$t = \sqrt{F} \quad (2.8)$$

Спостережуване значення t -критерію порівнювався з табличним критичним значенням t -критерію.

При перевірці значимості коефіцієнтів моделі множинної регресії критичне значення t -критерію визначається як функція: $t_{\text{крит}}(a, N_{\text{он}} - r - 1)$, де r – число оцінюваних по вибірці параметрів; $(N_{\text{он}} - r - 1)$ – число ступенів свободи, яке визначається по таблиці розподілів t -критерію Стюдента.

Якщо значення t -критерію, яке спостерігається більше критичного значення t -критерію, визначеного за таблиці розподілу Стюдента, тобто $t > t_{\text{крит}}$, то основна гіпотеза про незначущості коефіцієнта b_i моделі множинної регресії відкидається, і він є значущим. В іншому випадку гіпотеза про незначущості коефіцієнта b_i приймається, і він вважається незначним.

Максимальна відносна похибка апроксимації визначалася за формулою:

$$\Delta_{\text{max}} = \max \left(100 \cdot \frac{y_i - \tilde{y}_i}{y_i} \right) \quad (2.9)$$

де y_i – спостережуване значення залежної змінної; \tilde{y}_i – значення залежної змінної, знайдене з рівняння регресії

2.4 Структура роботи

Відповідно до поставленої в роботі мети і завдання дослідження, а також з урахуванням результатів попередніх досліджень було визначено основні етапи та структура роботи. На рисунку 2.1 представлена структура роботи, основними етапами якої є:

1 Стан питання.

1.1 Огляд і аналіз конструкцій мостових кранів.

1.2 Аналіз існуючих схем механізмів горизонтального пересування мосту і вантажного візка.

1.3 Аналіз існуючих математичних моделей механізму пересування вантажного візка (крана).

1.4 Аналіз сучасних систем автоматизації моделювання складних динамічних систем.

2 Методика виконання роботи.

2.1 Методика теоретичних досліджень.

2.2 Методика експериментальних досліджень.

3 Математичне моделювання мостового крана.

3.1 Розробка просторової розрахункової схеми мостового крана.

3.2 Математичний опис руху механічної підсистеми мостового крана.

3.3 Імітаційна модель механічної підсистеми мостового крана.

4 Теоретичні дослідження робочого процесу мостового крана.

4.1 Обґрунтування і вибір критеріїв ефективності робочого процесу мостового крана.

4.2 Моделювання динамічної навантаженості металоконструкції мостового крана.

4.3 Виявлення залежностей нормальних напружень і вертикальних переміщень, що виникають у вузлах металоконструкції крана.

4.4 Отримання регресійних залежностей основних параметрів кранового механізму мостового крана.

5 Експериментальні дослідження.

- 5.1 Об'єкт і обладнання експериментальних досліджень.
- 5.2 План експерименту.
- 5.3 Аналіз результатів експериментальних досліджень.
- 6 Практичне використання результатів виконаних досліджень.
- 6.1 Розробка інженерної методики розрахунку енергетичних характеристик механізму пересування вантажного візка (крана).
- 6.2 Впровадження результатів дослідження у виробництво.

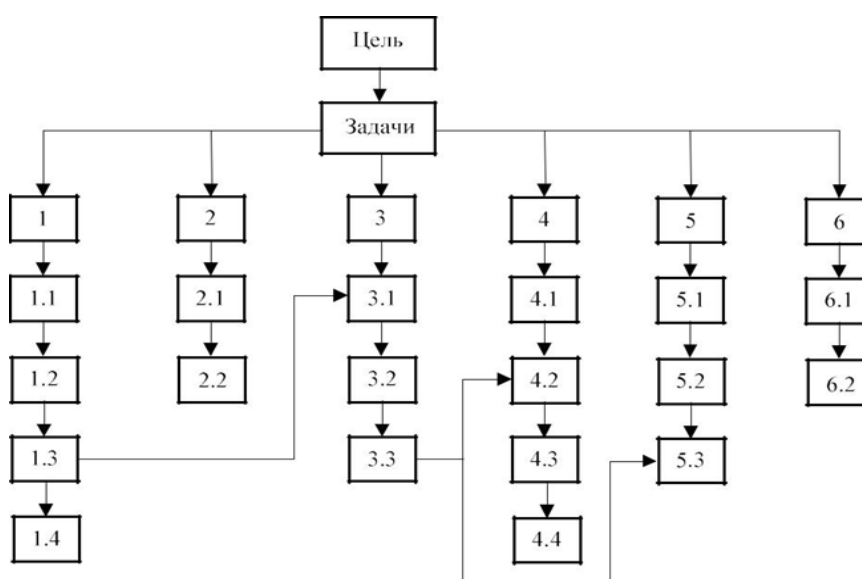


Рисунок 2.1 – Структурна схема роботи

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ

1. Для вирішення поставлених в роботі завдань обґрунтовано комплексний метод дослідження, що містить теоретичні і експериментальні дослідження.
2. На підставі аналізу методів планування експерименту в якості методики його планування обраний повний факторний експеримент.
3. Методика теоретичних досліджень базується на математичній моделі, яка з необхідною точністю відображає досліджувані властивості складної динамічної системи.
4. Методика експериментальних досліджень ґрунтується на методах регресійного і кореляційного аналізів.
5. Структура роботи заснована на принципах системного підходу і містить основні етапи роботи.

3 РОЗРОБКА МОДЕЛІ СКЛАДНОЇ ДИНАМІЧНОЇ СИСТЕМИ МОСТОВОГО КРАНА

3.1 Вибір і обґрунтування розрахункової схеми мостового крана

Динамічні розрахунки необхідні не тільки для визначення навантажень в ВПМ. Головне полягає в тому, щоб на основі цих розрахунків змінити конструкцію машини і вибрати її параметри такими, щоб знижувалися динамічні навантаження, зменшувалася зношуваність тертьових елементів, підвищувалася довговічність металоконструкції і механізмів [21]. При проектуванні мостових кранів важливим етапом є дослідження статичних і динамічних характеристик на основі адекватної математичної моделі. Це дозволяє поширити результати досліджень на широкий клас ГПМ різноманітного призначення і конструктивного виконання.

Однією з основних частин математичної моделі є розрахункова схема. При переході від реальної машини до її розрахункової схеми нехтують тими фізичними факторами, які для даного розрахунку мають несуттєве значення. При складанні узагальненої розрахункової схеми необхідно виконання головної умови: модель повинна бути певною мірою адекватна реальній системі і, наскільки це можливо, відображати основні фізичні властивості досліджуваної системи [22].

Мостовий кран представлений у вигляді системи кінематично пов'язаних тіл, ланками якої є металоконструкція, вантажний візок, крюкова обойма з вантажем, що характеризуються зосередженими масами.

На рисунку 3.1 зображена просторова узагальнена розрахункова схема мостового крана, що представляє собою систему з трьома масами, ланками якої є: маса моста, наведена до переміщення головних і кінцевих балок m_1 ; маса вантажного візка m_2 ; маса вантажу m_3 , що включає в себе також масу вантажозахоплювального пристрою. Кожній ланці відповідає своя локальна система координат.

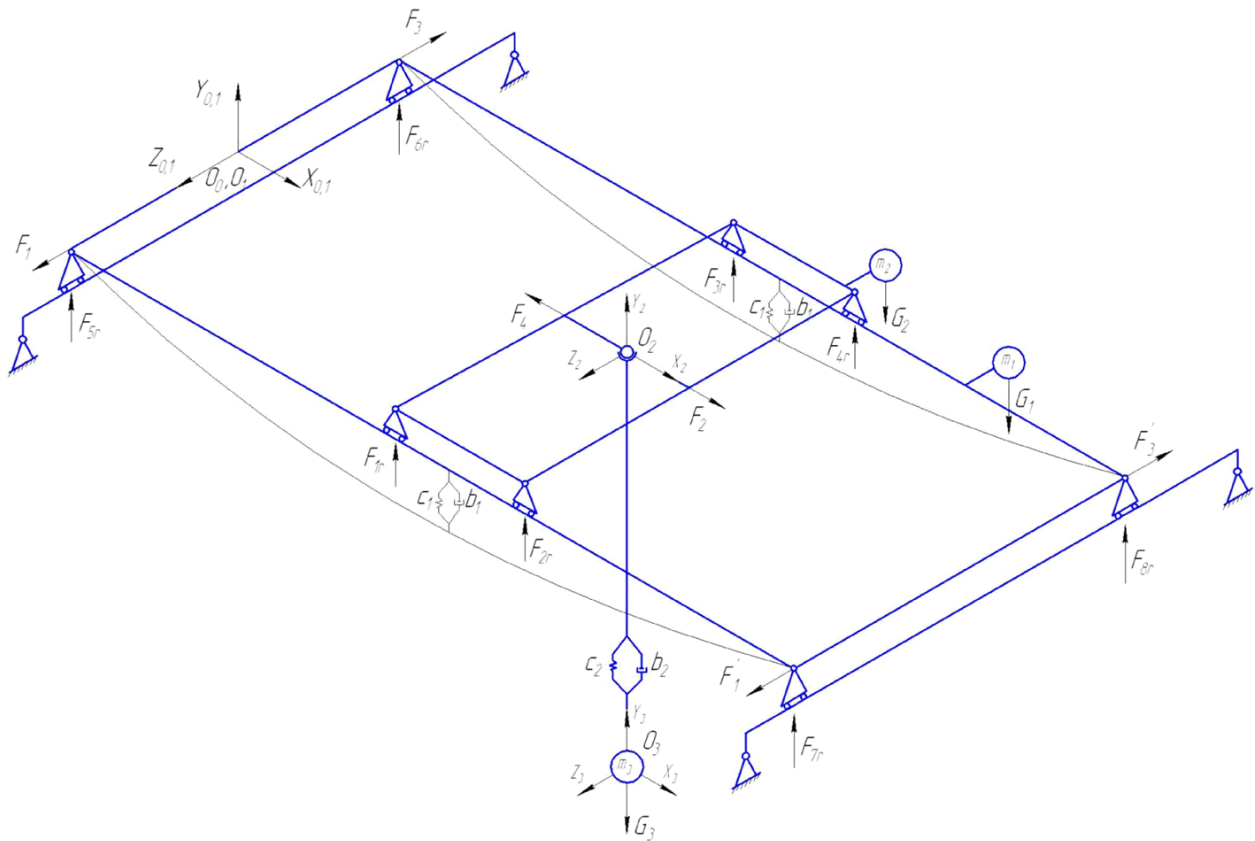


Рисунок 3.1 – Узагальнена розрахункова схема мостового крана

При складанні розрахункової схеми були прийняті наступні допущення:

1. Вантажопідіймальний кран представлений як система з зосередженими параметрами;
2. Модель голономна і нестационарна;
3. Поперечні зв'язку коліс прийняті ідеальними, тобто робота поперечних сил, що діють на кранові колеса, дорівнює нулю;
4. Гнучка підвіска вантажу замінена пружно-в'язковим зв'язком;
5. Не враховуються зазори в трансмісії і приводі;
6. Статичний опір пересуванню крана і візка постійно;
7. Пробуксовування ходових коліс по рейках при пуску і зупинці механізмів пересування відсутня.

Зазначені припущення не впливають на правомірність висновків і дозволяють отримати результати розрахунків з необхідною точністю.

Розрахункова схема мостового крана розглядається в інерційній системі координат $O_0X_0Y_0Z_0$, початок якої в рівноважному стані збігається з початком

локальної системи координат металокопструкції крана $O_1X_1Y_1Z_1$. Ось Y_0 спрямована уздовж гравітаційної вертикалі. Початок системи координат $O_2X_2Y_2Z_2$, пов'язаної з вантажним візком, знаходиться на рамі візка. Початок системи координат $O_3X_3Y_3Z_3$, пов'язаної з крюка обоймою і вантажем, знаходиться на самому вантажі. Ось Y_3 спрямована уздовж троса. Повороти системи координат $O_3X_3Y_3Z_3$ навколо власних осей забезпечують хитання вантажу.

Згідно з прийнятими припущеннями ланки представляються абсолютно жорсткими і характеризуються масами m_i , осьовими моментами інерції J_{ix} , J_{iy} , J_{iz} і відцентровими моментами інерції J_{ixy} , J_{ixz} , J_{iyz} . Маси ланок поле тяжіння формують сили тяжіння, зображені на узагальненій розрахунковій схемі G_i (де $i = 1, 2, \dots, n$ – номер ланки). Для знаходження координат центрів мас ланок, осьових і відцентрових моментів інерції використовувалися спеціалізований програмний продукт SolidWorks 2014.

Для спрощення математичної моделі доцільно зовнішні сили, що діють на ходове обладнання, зобразити на розрахунковій схемі еквівалентними складовими, прикладеними в певних точках. Таким чином, сили реакції опор представлені проекціями результуючих сил на осі інерційної системи координат: F_{ur} , де u – номер опори. Зовнішніми навантаженнями при розгоні крана і вантажного візка є рушійні сили, створювані електричними двигунами F_1 і F_2 , і сили опору пересуванню F_3 і F_4 відповідно.

Пружно-в'язкі властивості тросової підвіски з обоймою представлені на розрахунковій схемі пружно-в'язким тілом Фохта, що характеризується коефіцієнтом жорсткості c_2 і коефіцієнтом демпфірування підвіски вантажу b_2 . На розрахунковій схемі також пружними ланками є стрижні металокопструкції, позначені відповідно коефіцієнтом жорсткості металокопструкції c_1 і коефіцієнтом демпфірування b_1 .

Узагальнені координати, прийняті для даної просторової динамічної системи наведені в таблиці 3.1. Вони визначають координати будь-якої розрахункової точки механічної підсистеми в інерційній системі координат $O_0X_0Y_0Z_0$.

Таблиця 3.1 – Узагальнені координати $q_1 \dots q_3$ механічної системи мостового крана

	<i>Характеристика координати в локальній системі координат ланки</i>	<i>Позначення</i>	<i>Ступінь свободи</i>
Z_1	Переміщення моста крана уздовж осі	q_1	По ст.
осі X_2	Переміщення вантажного візка вздовж осі X_2	q_2	По ст.
	Переміщення вантажу уздовж осі Y_3	q_3	По ст.

3.2 Рівняння руху механічної підсистеми мостового крана

Для вирішення завдань динаміки системи з декількома ступенями рухливості, де рішення ускладнюється необхідністю аналізу і синтезу суміщеної в часі роботи механізмів, ефективними виявляються моделі руху в формі рівнянь Лагранжа:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial K}{\partial q_j} + \frac{\partial P}{\partial q_j} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_j} = F_j, \quad (j = 1, 2, \dots, l) \quad (3.1)$$

де K – кінетична енергія системи; P – потенційна енергія системи; Φ – дисипативна функція; t – час; q_j – j -ая узагальнена координата переміщення; \dot{q}_j – узагальнена координата швидкості; F_j – узагальнена сила, діюча по j -ой узагальненій координаті.

У векторно-матричному вигляді отримана система диференціальних рівнянь має вигляд [16]:

$$A \cdot \ddot{\vec{q}} + B \cdot \dot{\vec{q}} + C \cdot \vec{q} = \vec{F} \quad (3.2)$$

де $\vec{\ddot{q}}$ – матриця прискорень; $\vec{\dot{q}}$ – матриця швидкостей; \vec{q} – матриця переміщень; A – матриця інерції; B – матриця демпфірування; C – матриця жорсткості; \vec{F} – матриця зовнішніх сил.

Кінетична енергія механічної підсистеми мостового крана визначається як сума кінетичних енергій всіх ланок, що володіють інерційними властивостями [16]:

$$K = \sum_{i=1}^k K_i \quad (3.3)$$

Кожна ланка розглядається як сукупність безлічі точок з нескінченно малими масами d_m , координатами R_i , заданими в локальній системі координат i -ої ланки і відповідними елементарними кінетичними енергіями dK_i , [17]:

$$dK_i = \frac{1}{2} |\vec{R}_{0i}|^2 dm \quad (3.4)$$

Квадрат модуля вектора змін координат елементарної i -ої точки в інерційній системі координат обчислюється за формулою [16]:

$$|\vec{R}_{0i}|^2 = tr[\vec{R}_{0i} \cdot \vec{R}_{0i}^T] \quad (3.5)$$

де tr – траса, тобто сума діагональних елементів матриці розміром 4×4 .

Рівняння (3.4) з урахуванням прийнятих позначень та відповідно до правилами множення зчеплених матриць [17] має вигляд:

$$dK_i = \frac{1}{2} tr \left[\sum_{j=1}^l (U_{ij} \cdot \dot{q}_j) \cdot \vec{R}_i \cdot \vec{R}_i^T \cdot \sum_{j=1}^l (U_{ij}^T \cdot \dot{q}_j) \right] dm \quad (3.6)$$

Повна кінетична енергія i -ої ланки може бути отримана інтеграцією елементарних енергій всіх елементарних мас ланки :

$$\begin{aligned} K_i &= \frac{1}{2} tr \left[\sum_{j=1}^l (U_{ij} \cdot \dot{q}_j) \cdot \left[\int_m \vec{R}_i \cdot \vec{R}_i^T dm \right] \cdot \sum_{j=1}^l (U_{ij}^T \cdot \dot{q}_j) \right] = \\ &= \frac{1}{2} tr \left[\sum_{j=1}^l (U_{ij} \cdot \dot{q}_j) \cdot H_i \cdot \sum_{j=1}^l (U_{ij}^T \cdot \dot{q}_j) \right] \end{aligned} \quad (3.7)$$

де H_i – матриця інерції i -ої ланки.

$$H_i = \int_m \bar{R}_i \bar{R}_i^T dm \quad (3.8)$$

$$H_i = \begin{bmatrix} \int_m x_i^2 dm & \int_m x_i y_i dm & \int_m x_i z_i dm & \int_m x_i dm \\ \int_m x_i y_i dm & \int_m y_i^2 dm & \int_m y_i z_i dm & \int_m y_i dm \\ \int_m x_i z_i dm & \int_m y_i z_i dm & \int_m z_i^2 dm & \int_m z_i dm \\ \int_m x_i dm & \int_m y_i dm & \int_m z_i dm & m_i \end{bmatrix} = \quad (3.9)$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(-J_{ix} + J_{iy} + J_{iz}) & J_{ixy} & J_{ixz} & x_i m_i \\ J_{ixy} & \frac{1}{2}(J_{ix} - J_{iy} + J_{iz}) & J_{iyz} & y_i m_i \\ J_{ixz} & J_{iyz} & \frac{1}{2}(J_{ix} + J_{iy} - J_{iz}) & z_i m_i \\ x_i m_i & y_i m_i & z_i m_i & m_i \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(-\rho_{ix}^2 + \rho_{iy}^2 + \rho_{iz}^2) & \rho_{ixy}^2 & \rho_{ixz}^2 & x_i \\ \rho_{ixy}^2 & \frac{1}{2}(\rho_{ix}^2 - \rho_{iy}^2 + \rho_{iz}^2) & \rho_{iyz}^2 & y_i \\ \rho_{ixz}^2 & \rho_{iyz}^2 & \frac{1}{2}(\rho_{ix}^2 + \rho_{iy}^2 - \rho_{iz}^2) & z_i \\ x_i & y_i & z_i & 1 \end{bmatrix}$$

де m_i – маса i -ої ланки; J_{ix}, J_{iy}, J_{iz} – осьові моменти інерції i -ої ланки; $J_{ixy}, J_{ixz}, J_{iyz}$ – відцентрові моменти інерції i -ої ланки; $\rho_{ix}, \rho_{iy}, \rho_{iz}$ – радіуси інерції ланки; $\rho_{ixy}, \rho_{ixz}, \rho_{iyz}$ – відцентрові радіуси інерції; x_i, y_i, z_i – координати центру мас i -ої ланки в локальній системі координат цієї ланки.

Повна кінетична енергія динамічної системи мостового крана дорівнює:

$$K = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \text{tr} \left[\sum_{j=1}^l U_{ij} H_i U_{ij}^T \dot{q}_j^2 \right] \quad (3.10)$$

Перед підстановкою в диференціальне рівняння Лагранжа другого роду (3.1), вираз (3.10) необхідно продиференціювати:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial K}{\partial \dot{q}_j} \right] = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^l \text{tr} [U_{ij} H_i U_{ij}^T] \ddot{q}_j \quad (3.11)$$

Потенційна енергія визначається як сума потенційних енергій ланок механічної підсистеми мостового крана в полі тяжіння P_g і потенційних енергій пружно-в'язких елементів P_y [17]:

$$P = P_g + P_y \quad (3.12)$$

Потенційна енергія ланок механічної підсистеми мостового крана в полі тяжіння P_g визначається [17]:

$$P_g = \sum_{i=1}^k m_i g \vec{G}^T T_i \vec{R}_i \quad (3.13)$$

де g – прискорення вільного падіння; G – вектор сили тяжіння ланки в інерційній системі координат, визначається кутами нахилу поверхні, по якій рухається мостовий кран відносно горизонтальної площини; T_i – вектор переходу з однієї локальної координати в іншу.

$$\vec{G}^T = [x_g y_g z_g 1] \quad (3.14)$$

У разі, коли мостовий кран знаходиться на рівній горизонтальній поверхні, вектор сили тяжіння має вигляд:

$$\vec{G}^T = [0101] \quad (3.15)$$

Потенційна енергія пружно-в'язких елементів визначається рівнянням Клайперона [16]:

$$P_y = \frac{1}{2} \sum_{u=1}^n c_u \lambda_u^2 \quad (3.16)$$

де c_u – коефіцієнт пружності u -го пружно-в'язкого елемента; λ_2 – повна деформація u -го пружно-в'язкого елемента.

З урахуванням прийнятих позначень вираз (3.16) набуде вигляду

$$P_y = \frac{1}{2} \sum_{u=1}^n c_u |\vec{R}_u|^2 \quad (3.17)$$

У результаті отримаємо:

$$P_y = \frac{1}{2} \sum_{u=1}^n \text{tr}[F_u N_u F_u^T] \quad (3.18)$$

$$F_u = \sum_{j=1}^l M_{uj} q_j \quad (3.19)$$

$$N_u = c_u [\vec{R}_{ur} \vec{R}_{ur}^T] \quad (3.20)$$

де F_u – матриця сил, що діють на тіло Фохта; N_u – матриця пружності розміром 4×4 ; M_{uj} – диференціал матриці F_u по узагальненій координаті q_j ; R_{ur} – вектор рухомого кінця тіла Фохта.

Рівняння потенційної енергії механічної підсистеми мостового крана має вигляд:

$$P = \sum_{i=1}^k m_i g \vec{G}^T T_i \vec{R}_i + \frac{1}{2} \sum_{u=1}^n \text{tr}[F_u N_u F_u^T] \quad (3.21)$$

Для підстановки в диференціальне рівняння Лагранжа продиференціюємо вираз (3.21), в результаті отримаємо:

$$\frac{\partial P}{\partial q_j} = \sum_{i=1}^k m_i g \vec{G}^T U_{ij} \vec{R}_i + \sum_{u=1}^n \sum_{j=1}^l \text{tr}[M_{uj} N_u M_{uj}^T] q_j \quad (3.22)$$

Дисипативна функція пружно-в'язких елементів визначається по функції Релея:

$$\Phi = \frac{1}{2} \sum_{u=1}^n b_u \dot{\lambda}_u^2 \quad (3.23)$$

$$\Phi = \frac{1}{2} \sum_{u=1}^n b_u |\dot{\vec{R}}_u|^2 \quad (3.24)$$

де b_u – наведений коефіцієнт в'язкого тертя u -го пружно-в'язкого елемента; $\dot{\lambda}_u$ – швидкість деформації u -го елемента.

Продиференціювавши вираз (3.24) отримаємо:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_j} = \sum_{u=1}^n \sum_{j=1}^l \text{tr}[M_{uj} B_u M_{uj}^T] \dot{q}_j \quad (3.25)$$

де

$$B_u = b_u [\vec{R}_{ur} \cdot \vec{R}_{ur}^T] \quad (3.26)$$

Узагальнена зовнішня сила, що діє на динамічну систему, буде обчислюватися як сума всіх сил, прикладених до ланок розрахункової схеми:

$$F_j = \sum_{r=1}^m \vec{F}_r \frac{\partial \vec{R}_{0r}}{\partial q_j} \quad (3.27)$$

$$F_j = \sum_{r=1}^m \vec{F}_r \cdot U_{ij} \cdot \vec{R}_{ir} \quad (3.28)$$

де $\vec{F}_r = [F_{rx} \ F_{ry} \ F_{rz} \ 1]$ – зовнішня сила, яка прикладена до i -ої ланки розрахункової схеми; \vec{R}_{0r} – вектор положення точки, заданий в інерційній системі координат, до якої прикладається сила; \vec{R}_{ir} – вектор положення точки, заданої в локальній системі координат, до якої прикладається сила.

В результаті всіх підстановок в диференціальне рівняння Лагранжа отримуємо загальне рівняння системи диференціальних рівнянь:

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^l \text{tr}[U_{ij}H_iU_{ij}^T]\ddot{q}_j + \sum_{u=1}^n \sum_{j=1}^l \text{tr}[M_{uj}B_uM_{uj}^T]\dot{q}_j \\ & + \sum_{u=1}^n \sum_{j=1}^l \text{tr}[M_{uj}N_uM_{uj}^T]q_j + \sum_{i=1}^k m_i g \vec{G}^T U_{ij} \vec{R}_i = \sum_{r=1}^m \vec{F}_r U_{ij} \vec{R}_{ir} \end{aligned} \quad (3.29)$$

У векторно-матричному вигляді [16]:

$$A \cdot \ddot{\vec{q}} + B \cdot \dot{\vec{q}} + C \cdot \vec{q} = \vec{F} \quad (3.30)$$

де A, B, C - матриці коефіцієнтів диференціальних рівнянь розміром $l \times l$; $\vec{q}, \dot{\vec{q}}, \ddot{\vec{q}}$ - вектори-стовпці, що представляють відповідно малі відхилення, швидкості і прискорення узагальнених координат; вектор-стовпець узагальнених сил.

Елементи матриць A, B, C визначаються за формулами:

$$a_{jp} = \sum_{i=1}^k \text{tr}[U_{ij}H_iU_{ip}^T] \quad (3.31)$$

$$b_{jp} = \sum_{u=1}^n \text{tr}[M_{uj}B_uM_{up}^T] \quad (3.32)$$

$$c_{jp} = \sum_{u=1}^n \text{tr}[M_{uj}N_uM_{up}^T] \quad (3.33)$$

Таким чином, рівняння руху механічної системи мостового крана, записане в векторно-матричній формі, являє собою систему з диференціальних рівнянь другого роду зі змінними коефіцієнтами.

Отриману систему диференціальних рівнянь можна розв'язати різними способами, у результаті прийняття рішень є тимчасові залежності зміни узагальнених координат, які відображають переміщення в просторі конструктивних елементів мостового крана.

Згідно обраним ступенями свободи q_1, q_2, q_3 складена система диференціальних рівнянь, що описує рух мостового крана, форма якої представлена у вигляді нерівності:

$$\begin{aligned}
 m_1 \cdot q_1 + b_1 q_1 - q_2 + c_1 q_1 - q_2 - F_1 + F_3 &= 0; \\
 m_2 \cdot q_2 - b_1 q_1 - q_2 - c_1 q_1 - q_2 + b_2 q_2 - q_3 + c_2 q_2 - q_3 & \\
 m_3 \cdot q_3 - b_2 q_2 - q_3 & \\
 -c_2 q_2 - q_3 &= 0 \qquad -F_2 + F_4 = 0;
 \end{aligned} \tag{3.34}$$

В якості вихідних умов моделювання руху візка приймалися параметри переміщень і швидкостей в момент пуску двигуна:

$$\begin{aligned}
 (q_1)_{t=0} &= (q_2)_{t=0} = (q_3)_{t=0} = 0; \\
 (\dot{q}_1)_{t=0} &= (\dot{q}_3)_{t=0} = (\dot{q}_2)_{t=0} = V_0
 \end{aligned} \tag{3.35}$$

де V_0 – швидкість вала двигуна при холостому ході, м/с.

У розрахунку рушійні сили F_1 і F_2 , що змінюються відповідно до механічної характеристики електроприводу, приймалися постійними.

Коефіцієнти рівнянь являють собою основні характеристики модельованої системи. Для вирішення системи рівнянь (3.34) необхідно попередньо провести розрахунок коефіцієнтів, що входять в систему однорідних диференціальних рівнянь.

1. Маса моста крана визначається [23]:

$$m_1 \approx 0.96 \cdot Q + 0.85 \cdot L \tag{3.36}$$

де Q – вантажопідйомність крана, кг; L – проліт крана, м.

2. Маса вантажного візка визначається [23]:

$$m_2 \approx 0.25 \cdot Q \tag{3.37}$$

3. Коефіцієнт жорсткості металоконструкції крана в горизонтальній площині c_1 визначається різними способами відповідно до необхідної точністю розрахунку.

В роботі М.М. Гохберг визначає коефіцієнт жорсткості металоконструкції за такою залежністю [23]:

$$c_1 = \frac{N}{f_L} = \frac{48EJ_y}{L^3} \tag{3.38}$$

де L_y – момент інерції перетину двох головних балок щодо їх вертикальних осей, кг м²; f_L – вертикальне переміщення моста крана в середині прольоту при його навантаженні силою (рисунок 3.2, а).

У дослідженнях П.Б. Гольдман визначає прогин головних балок в горизонтальній площині від зосередженого інерційного навантаження з урахуванням впливу жорсткості кінцевих балок (рисунок 3.2, б) [24]:

$$f_L = \frac{NL^3}{16EJ_y} \cdot \left[\frac{1}{3} - \frac{3}{4} / \left(\frac{k}{L} \cdot \varphi + 3 \right) \right] \quad (3.39)$$

тоді

$$c_1 = \frac{32EJ_y}{L^3 \cdot \left[\frac{1}{3} - \frac{3}{4} / \left(\frac{k}{L} \cdot \varphi + 3 \right) \right]} \quad (3.40)$$

де J_y – момент інерції перерізу головної балки щодо вертикальної осі, кг м²; k – колія візка, м; $\varphi = J_y/J_{yк}$ ($J_{yк}$ – момент інерції кінцевої балки щодо вертикальної осі).

В роботі І.М. Один визначає прогин головних балок в горизонтальній площині з урахуванням впливу жорсткості кінцевих балок і їх консолей (рисунок, 3.2, в) [24]:

$$f_L = \frac{NL^3}{192EJ_y} \cdot \left(4 - \frac{3L}{r} \right) \quad (3.41)$$

тоді

$$c_1 = \frac{384EJ_y}{L^3 \cdot \left(4 - \frac{3L}{r} \right)} \quad (3.42)$$

де

$$r = L + \frac{8 \cdot ((B - k)/2)^3 + k^3}{3B^2} \cdot \frac{J_y}{J_{yк}} \quad (3.43)$$

де B – база крана, м.

У дослідженнях Н.А. Лобов визначає коефіцієнт жорсткості крана в горизонтальній площині за розрахунковою схемою на малюнку 3.2,:

$$c_1 = \frac{1}{\frac{L^3}{96EJ_y} \cdot \left(\frac{3}{4}\beta - \frac{1}{2}\right) - \frac{L^2}{384EJ_{yк}} \cdot \frac{7B^2 - 29k(B - k)}{B} \beta} \quad (3.44)$$

$$\beta = \frac{1}{1 + \frac{k(B - k)J_y}{3BLJ_{yк}}} \quad (3.45)$$

4. Коефіцієнт загасання коливань (демпфірування) металокопструкції [23]:

$$b_1 = \frac{\delta_M}{\pi \cdot \omega} \quad (3.46)$$

де ω – частота власних коливань металокопструкції крана, c^1 ; δ_M – логарифмічний декремент коливань мосту.

5. Коефіцієнт жорсткості вантажного каната c_2 [22]:

$$c_2 = \frac{E_k F_k m a}{l_k} \quad (3.47)$$

де E_k – модуль пружності підйомних канатів, Па; F_k – площа металевого перетину каната, m^2 ; m – кількість поліспаствів; a – кратність поліспаства; l_k – довжина схилу каната, тобто відстань від осі блоків підвіски вантажу до осі барабана, м.

6. Коефіцієнт загасання коливань (демпфірування) каната b_2 :

$$b_2 = \frac{2m_3 \delta_k}{T} \quad (3.48)$$

де T – період коливань; δ_k – логарифмічний декремент коливань каната.

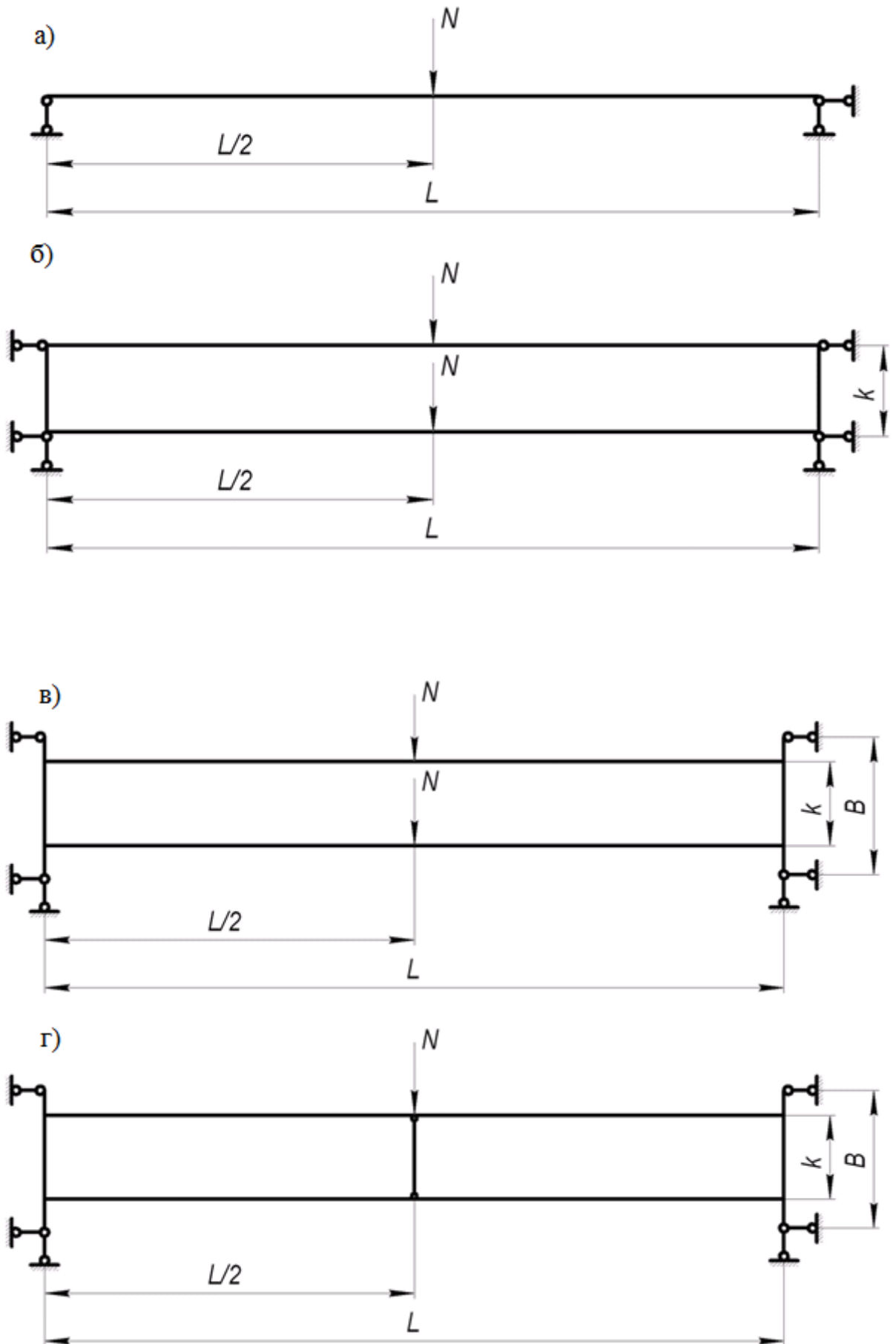


Рисунок 3.2 – Розрахункові схеми моста крана при визначенні коефіцієнта горизонтальної жорсткості

Система рівнянь (3.34) вирішувалася чисельним методом. Даний метод володіє найбільшими обчислювальними можливостями і дозволяє інтегрувати широкий клас диференціальних рівнянь з високою точністю. Для чисельного рішення диференціальних рівнянь механічної підсистеми застосовувався метод Рунге-Кутта 4-5 порядку, модифікований Фельбергом. Даний метод реалізований в системі Maple вирішувачів gkf45 [18].

Для досліджуваного мостового крана вантажопідйомністю 20/5 т були задані наступні параметри:

$$m_1 = 19500 \text{ кг}; m_2 = 9400 \text{ кг}; m_3 = 20000 \text{ кг}; F_1 = 15 \text{ кН}; F_2 = 8 \text{ кН}; F_3 = 10 \text{ кН}; F_4 = 5 \text{ кН}; c_1 = 6900 \frac{\text{кН}}{\text{м}}; c_2 = 20 \frac{\text{кН}}{\text{м}}; b_1 = 17.9 \text{ кН} \cdot \frac{\text{с}}{\text{м}}; b_2 = 450 \text{ кН} \cdot \frac{\text{с}}{\text{м}}.$$

[23]. Графічне представлення результатів рішення системи диференціальних рівнянь (3.34) при початкових умовах (3.35) показано на рисунках 3.3, 3.4.

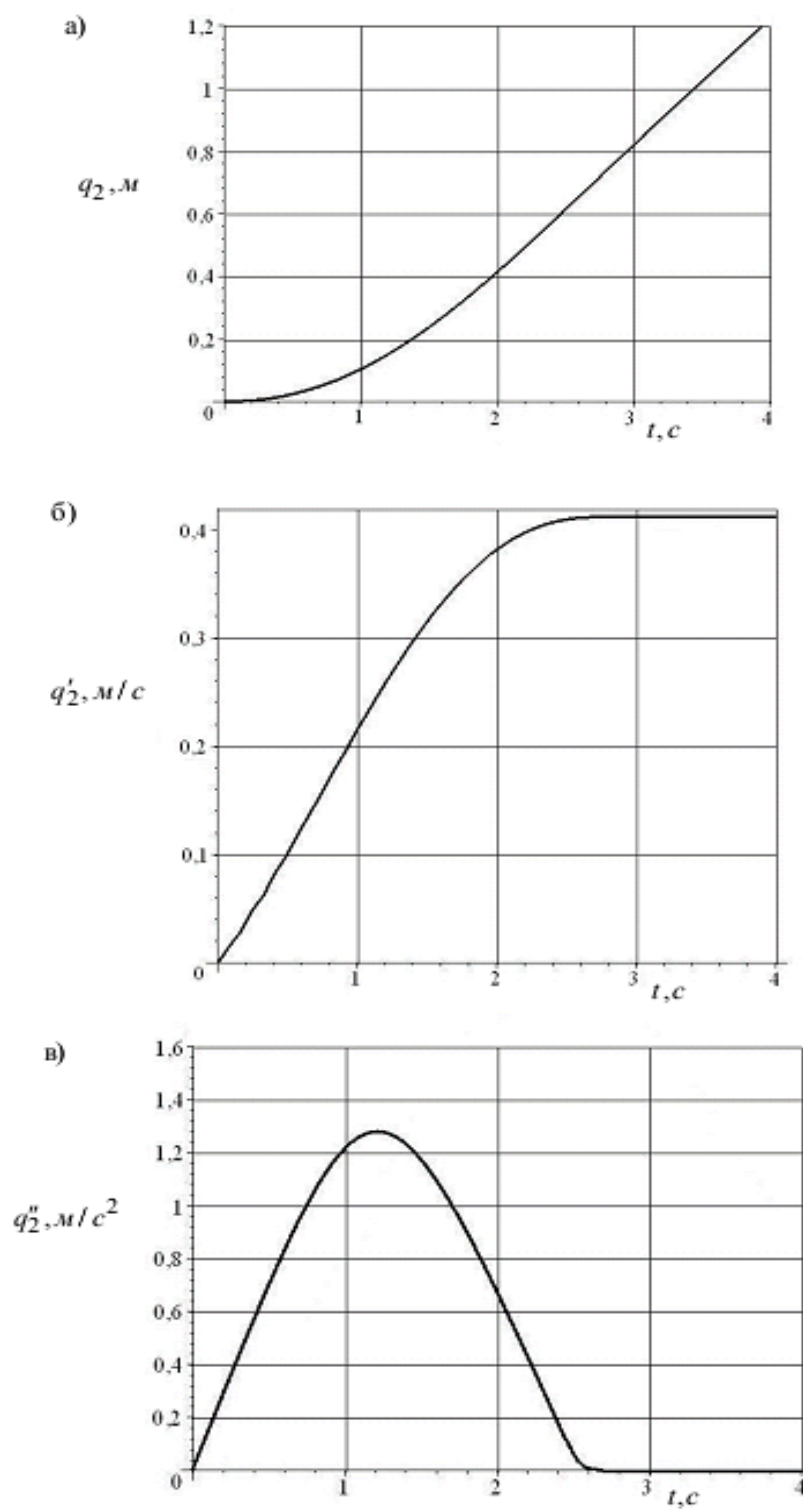


Рисунок 3.3 – Графічне представлення результатів рішення системи диференціальних рівнянь при $m_B = 20$ т:

а – переміщення візка; б – швидкість візка; в – прискорення візка

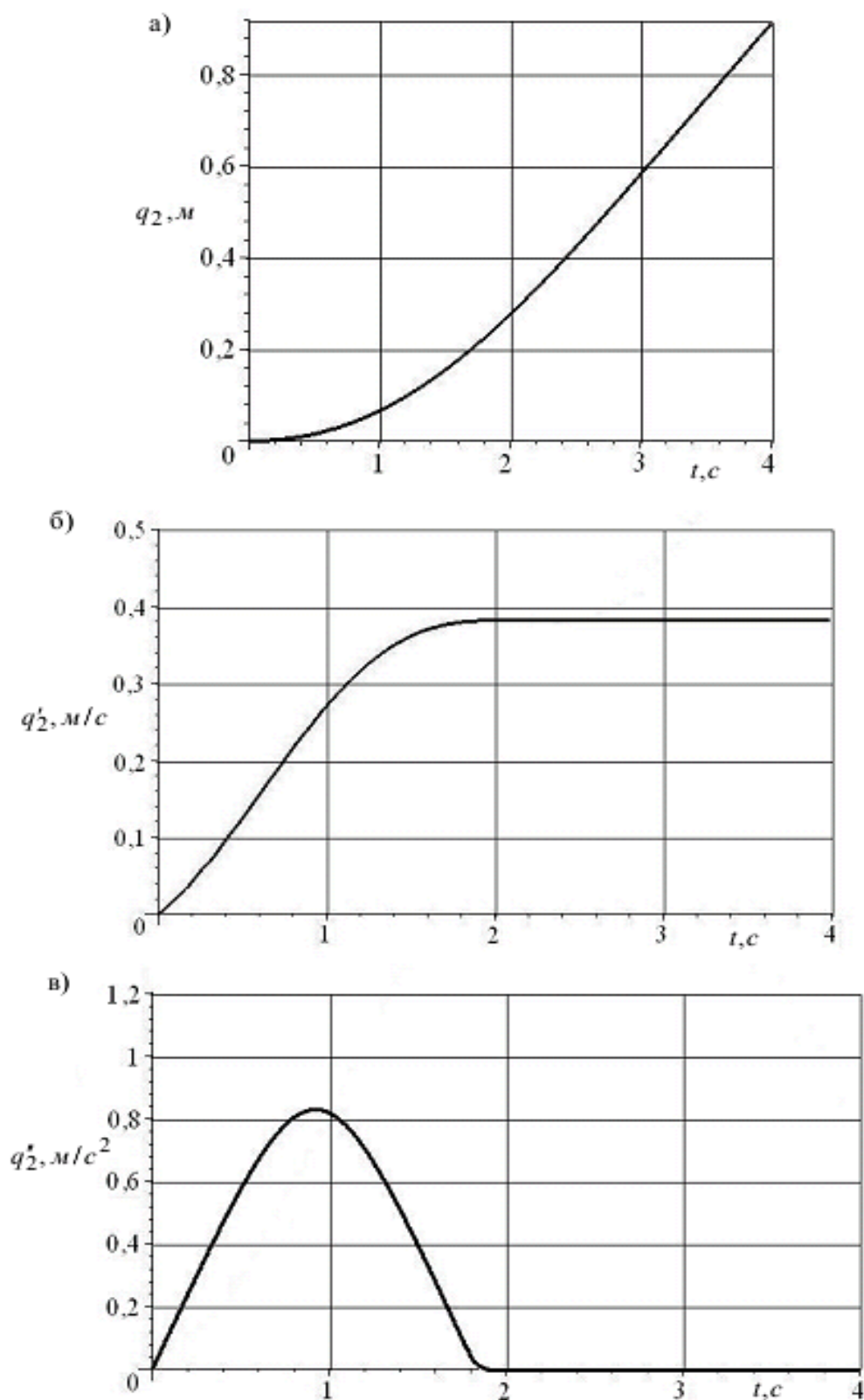


Рисунок 3.4 – Графічне представлення результатів рішення системи диференціальних рівнянь $m_B = 5$ т:

а – переміщення візка; б – швидкість візка; в – прискорення візка

3.3 Імітаційна модель механічної підсистеми мостового крана

В якості інструментів побудови імітаційної моделі механічної підсистеми мостового крана було обрано програмний продукт SolidWorks. Вибір обумовлений широкими функціональними можливостями пакета, а також наявністю відповідних сертифікатів, що підтверджують якість даного продукту. SolidWorks забезпечує наскрізну автоматизовану підтримку процесу проектування, включаючи геометричне моделювання, експрес-аналіз міцності деталей і кінематики механізмів на етапі конструкторського опрацювання. Ця одна з найпопулярніших систем параметричного моделювання, твердотілого і поверхневого.

Тривимірна твердотіла модель мостового крана вантажопідйомністю 20/5 т прольотом 22,5 м, розроблена в програмному комплексі SolidWorks, представлена на рисунку 3.5. Розміри моделі виконані відповідно до документації на кран.

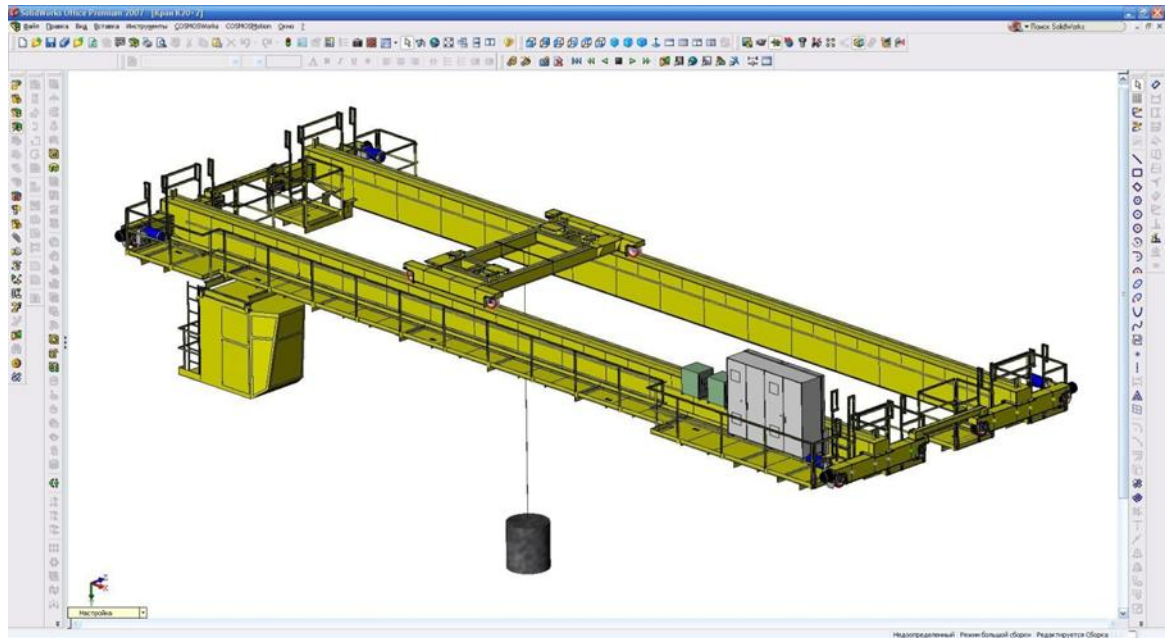


Рисунок 3.5 – Тривимірна модель крана в середовищі SolidWorks

Для створення тривимірної моделі мостового крана використовувався метод проектування знизу вгору. Процес моделювання починався з вибору конструктивної площини, в якій був побудований двомірний ескіз деталі. Згодом цей ескіз був перетворений в тверде тіло. Всі деталі створювалися окремо

один від одного. Далі проводилася збірка мостового крана зі створених деталей. Складання компонентів здійснювалося за допомогою сполучень, що обмежують їх свободу. При цьому модель має центр ваги, а також володіє масою і об'ємом.

Використовуючи вбудовану функцію розрахунку МЦХ, отримані дані про координати центрів ваги і моментах інерції елементів, що входять в модель. Приклад відображається МЦХ крана показаний на рисунку 3.6.

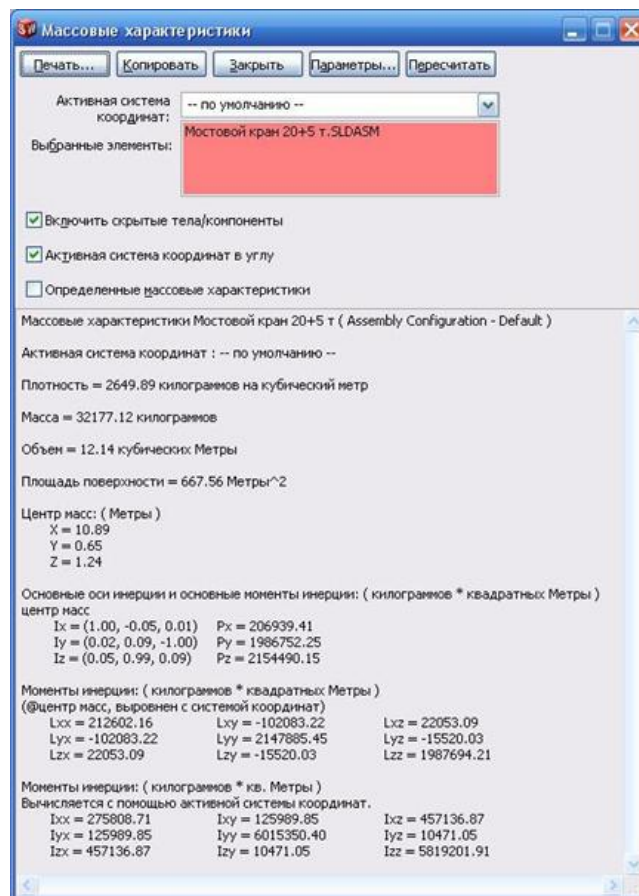


Рисунок 3.6 – Вид вікна розрахунку МЦХ крана

Мостовий кран представлений системою пов'язаних тіл з заданими інерційними параметрами. Тіла з'єднані один з одним за допомогою різного роду шарнірів, які, в свою чергу, задають положення і можливі переміщення тіл. Металоконструкція моста являє собою раму, утворену головними і кінцевими балками. До рами нерухомо кріпляться кабіна і майданчик для обслуговування цехових тролей. Вантажний візок має одну ступінь свободи щодо рами і може переміщатися уздовж прольоту між кінцевими балками. Вантаж являє собою

фізичний маятник, який може здійснювати просторові коливання відносно точки кріплення каната до візка.

У даній роботі моделювання основних динамічних характеристик мостового крана при пересуванні вантажного візка здійснювалося в додатку SolidWorks Motion програми SolidWorks. Джерелом інформації для програми є модель збірки в SolidWorks. Дане розширення призначене для математичного моделювання рухів систем твердих тіл на основі законів теоретичної механіки. SolidWorks Motion дозволяє вирішувати завдання статички, кінематики та динаміки багатоланкових механічних систем. Програма аналізує збірку SolidWorks, транслюючи її в умовну модель механізму з урахуванням МЦХ деталей. При цьому інерційні параметри запозичуються з геометрії деталей SolidWorks, а щільність (маса) може бути призначена незалежно від геометричної оболонки. Модуль SolidWorks Motion автоматично перетворює структурну схему механічної підсистеми в систему диференціальних рівнянь руху. На вибір пропонується кілька способів вирішення диференціальних рівнянь. Після цього програма перетворює чисельні результати в вид, придатний для відображення. Дана програма використовується для дослідження динамічних процесів мостового крана, а також для оптимального підбору його динамічних характеристик.

При моделюванні механічної підсистеми крана використовувалося меню Joints. Блоки Joints служать для організації різного роду зчленувань між окремими частинами механізму. При створенні з'єднань вказувалися деталі, місця докладання з'єднань і напрямки.

З'єднання Joints, що входять в модель задають наступні ступені свободи:

- Revolute Joint (шарнір повороту) → обертальний шарнір, який має одну ступінь свободи - поворот навколо заданої осі координат. В параметрах блоку вказується координатна вісь, навколо якої здійснюється поворот;

- Cylindrical Joint (циліндричний шарнір) → дозволяє імітувати таке шарнірне зчленування, яке забезпечує поворот навколо заданої осі з одночасним переміщенням уздовж цієї ж осі;

- Spherical Joint (сферичний шарнір) → забезпечує три обертальні ступені свободи тіла.

Важливою особливістю даної групи зв'язків є те, що вони активні протягом всього періоду роботи механізму.

На початку роботи в модулі SolidWorks Motion були визначені рухомі (Moving Parts) і закріплені (Ground Parts) деталі, що увійшли в динамічну схему. Для моделювання реальних умов контакту коліс візка від рейок головних балок, моделі коліс зберігали геометричну форму реальної конструкції, тобто мали реборди. Взаємодія кранових коліс з рейкою моделювалося через Constraint (Зв'язок) Contact 3D (просторовий контакт), що дозволяє моделювати взаємодію тіл в найбільш загальному вигляді. Параметри контакту призначалися на вкладці Contact (рисунок 3.7).

При моделюванні каната використовувався блок Spring (Пружина), що моделює пружно-в'язкий зв'язок. Даний блок має на увазі поєднання двох деталей віртуальною пружиною розтягування-стиснення. Пружина створювалася в такий спосіб. З контекстного меню піктограми Spring, розташованої в галузі Forces (Сили), подавалася команда Add Linear Spring (Вставити лінійну пружину). Після виклику команди з'являлося вікно Edit Spring (Редагувати пружину). Характеристики пружини, що стосуються динамічного аналізу, зосереджені на вкладці Definition (Визначення) (рисунок 3.8).

В якості вантажу моделювався суцільний циліндр з розмірами: $R = 0.8$ м; $h = 1.3$ м. Моменти інерції циліндра визначалися по відомим залежностям [17]:

$$J_x = \frac{m_B \cdot R^2}{4} + \frac{m_B \cdot h^2}{12}; \quad J_y = \frac{m_B \cdot R^2}{4} + \frac{m_B \cdot h^2}{12};$$

$$J_z = \frac{m_B \cdot R^2}{2} \quad (3.49)$$

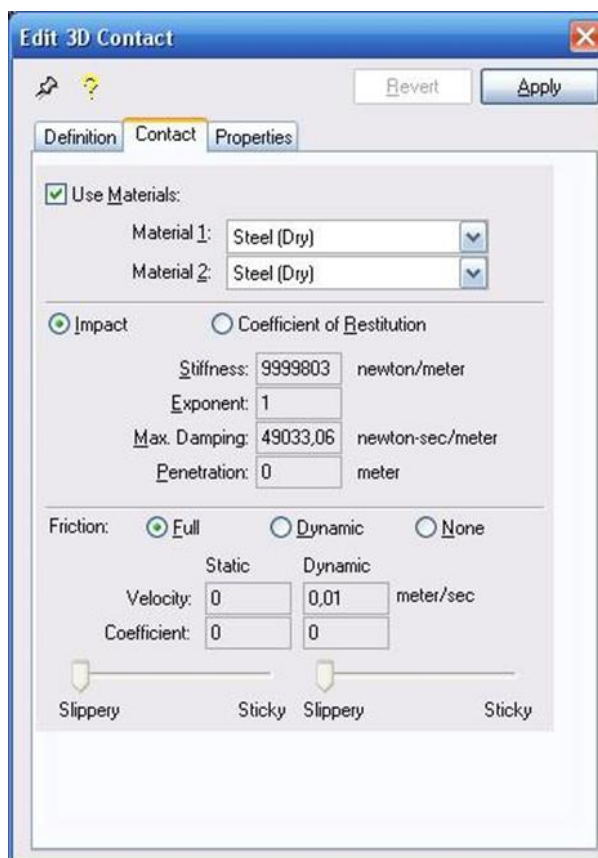


Рисунок 3.7 – Призначення параметрів контактної пари

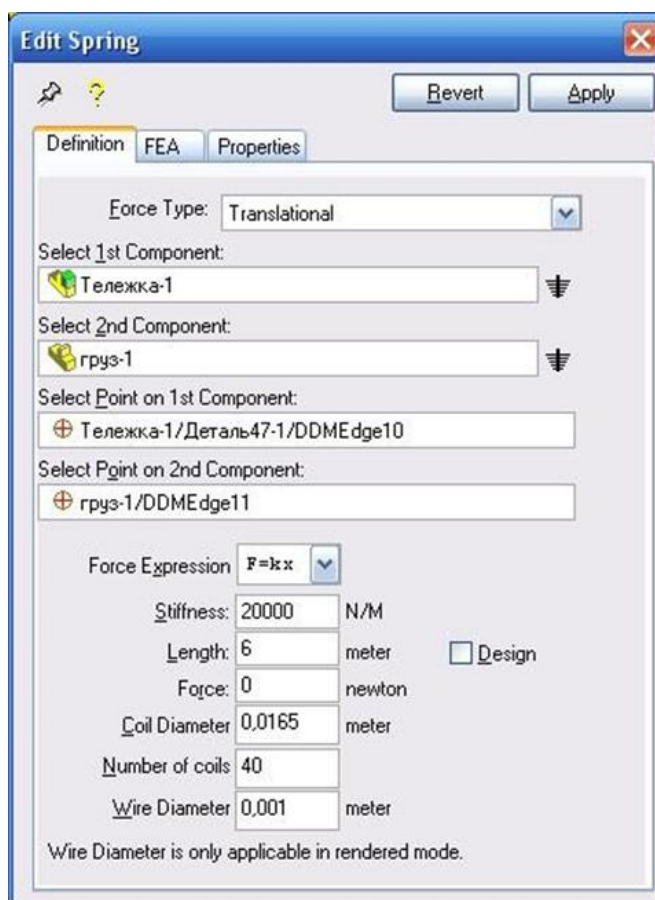


Рисунок 3.8 – Параметри пружини

Вихідні дані моделювання задавалися як в режимі довільного доступу до того чи іншого вікна, так і за допомогою процедури Intelli Motion Builder (Майстер проекту). Після використання Майстра розрахункову модель можна змінювати довільним чином. Також були визначені параметри обчислювального процесу, інші настройки програми, які не прив'язані до моделі. Вони зосереджені в вікні COSMOSMotion Options. На вкладці Gravity відповідно до геометрії і положення конструкції в глобальній системі координат задавався напрямок гравітації. В параметрах даного блоку задано прискорення вільного падіння, яке діє за осі OY_0 : $g = -9,81 \text{ м/с}^2$.

В якості вихідних даних задавалася величина моменту від приводного двигуна. Далі задавався генератор руху, тобто додаток навантаження. Для представленої моделі заданий крутний момент на два приводних колеса в залежності від частоти обертання двигуна. При моделюванні процесу пересування момент задавався таким чином. В активному вікні застосування COSMOSMotion в групі деталей Moving Parts для ходового колеса виконувалася команда Add Force - Action Only - Moment. Для заповнення вікна, що з'явилося Insert вказувалася друга деталь - рейок, що означало завдання паралельності руху щодо цих деталей. Далі визначалися характеристики руху. Для цього на вкладці Function призначався закон руху Spline. У двох вікнах, які з'явилися, задавалися параметри частоти обертання і крутного моменту. При цьому інерційні параметри, щільність і маса запозичувалися з геометрії деталей SolidWorks. Аналогічну операцію було виконано і для другого приводного колеса.

Для аналізу результатів моделювання механічної підсистеми мостового крана необхідна візуалізація результатів моделювання. Традиційно використовується візуалізація у вигляді часових залежностей досліджуваних параметрів. Однак, при моделюванні просторових рухів механічної підсистеми, найбільшою наочністю в поданні результатів володіє тривимірна анімація. Такий спосіб візуалізації просторових переміщень незамінний для механічної підсистеми, яка володіє великою кількістю ступенів свободи. Представлення результатів у формі анімації може істотно скоротити час, що витрачається дослідником для

аналізу, так як для якісної оцінки просторових рухів не потрібно зіставлення безлічі часових залежностей окремих координат, що описують стан ланок.

Для отримання реалістичної тривимірної анімації моделі механічної підсистеми в налаштуваннях візуалізації геометрії тіл використовуються зовнішні графічні файли. Наочне уявлення руху вантажного візка отримано за допомогою вбудованої функції Play візуалізації, що дозволяє швидше помічати помилки при аналізі системи (рисунок 3.9).

За допомогою складеної моделі можна отримувати будь-які перехідні процеси. В результаті моделювання отримані основні динамічні характеристики, що виникають при пересуванні вантажного візка мостового крана (рисунок 3.10 - 3.12).

Для використання отриманої математичної моделі в подальших дослідженнях потрібно провести перевірку її адекватності на підставі реального експерименту, що розглянуто в підрозділі 1.

В результаті отримані основні динамічні характеристики, такі як переміщення, швидкості, прискорення, час розгону. При цьому програма дозволяє виконати оптимізацію конструкції шляхом зміни різних параметрів системи. Аналізуючи отримані дані, можна зробити висновок, що перехідні динамічні процеси в механізмі пересування вантажного візка призводять до появи аналогічних процесів в металоконструкції крана.

Основним фактором, що визначає характер процесу руйнування елементів металоконструкції, є їх ПДВ.

З точки зору дослідження ПДВ кранові металоконструкції є досить складні просторові системи, для розрахунку яких не застосовуються традиційні методи розрахунку. Аналітичні розрахунки з використанням моделей і методів опору матеріалів та будівельної механіки вимагають істотних спрощень і ідеалізації реальних конструкцій, в результаті чого в більшості випадків виходять досить наближені оцінки параметрів ПДВ.

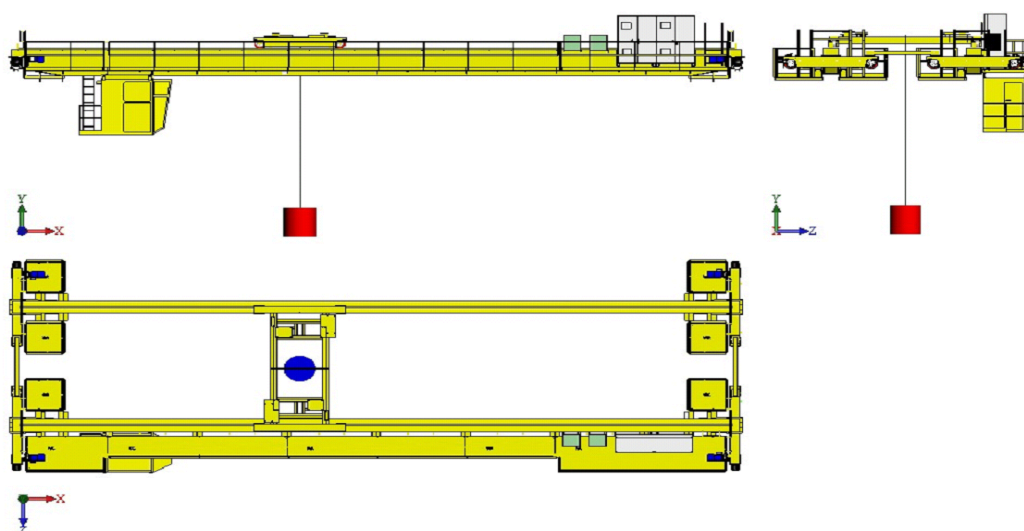


Рисунок 3.9 – Приклад тривимірної анімації механічної підсистеми мостового крана в процесі моделювання

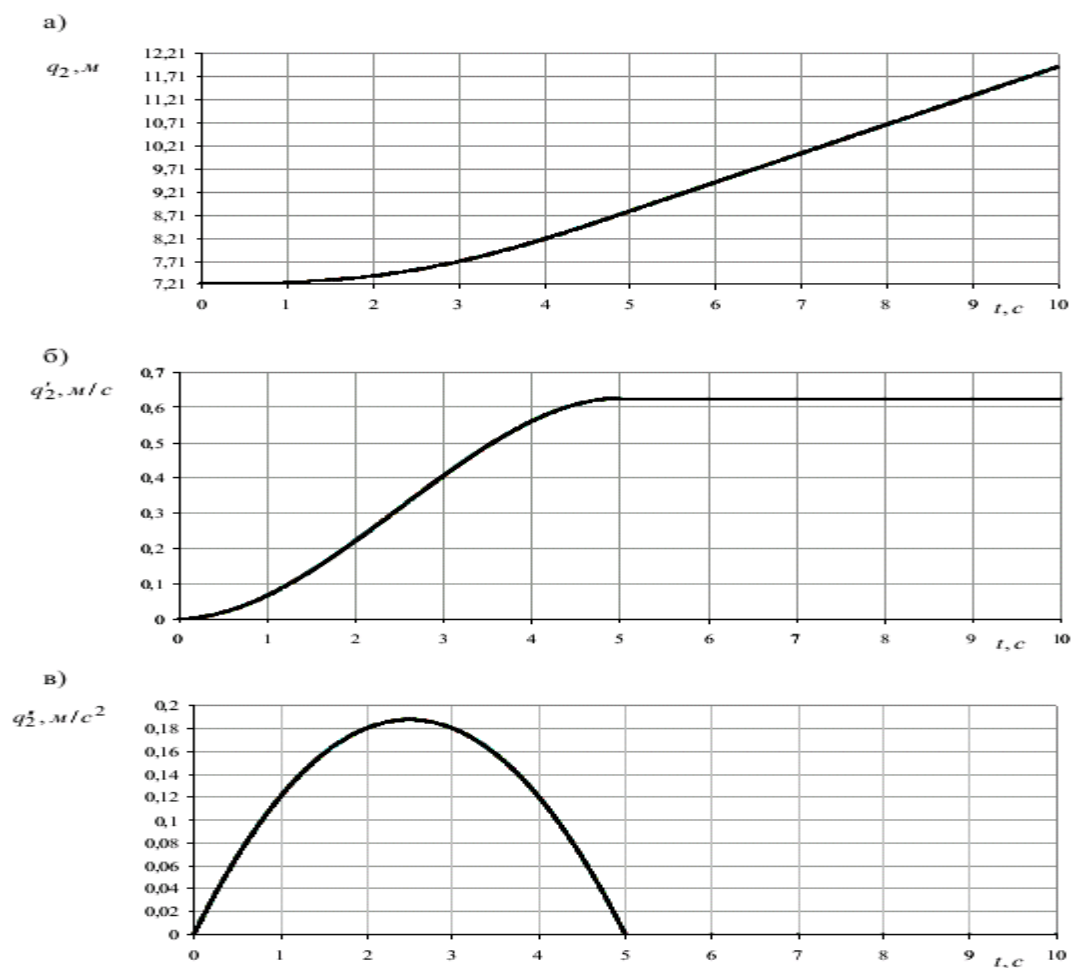


Рисунок 3.10 – Графіки перехідних процесів, які виникають при переміщенні вантажного візка:

а – переміщення; б – швидкість; в – прискорення

Зазначені особливості обумовлюють необхідність використання наближе-

них моделей і чисельних методів при розрахунках ПДВ.

Таким чином, постає завдання визначення параметрів розрахункової

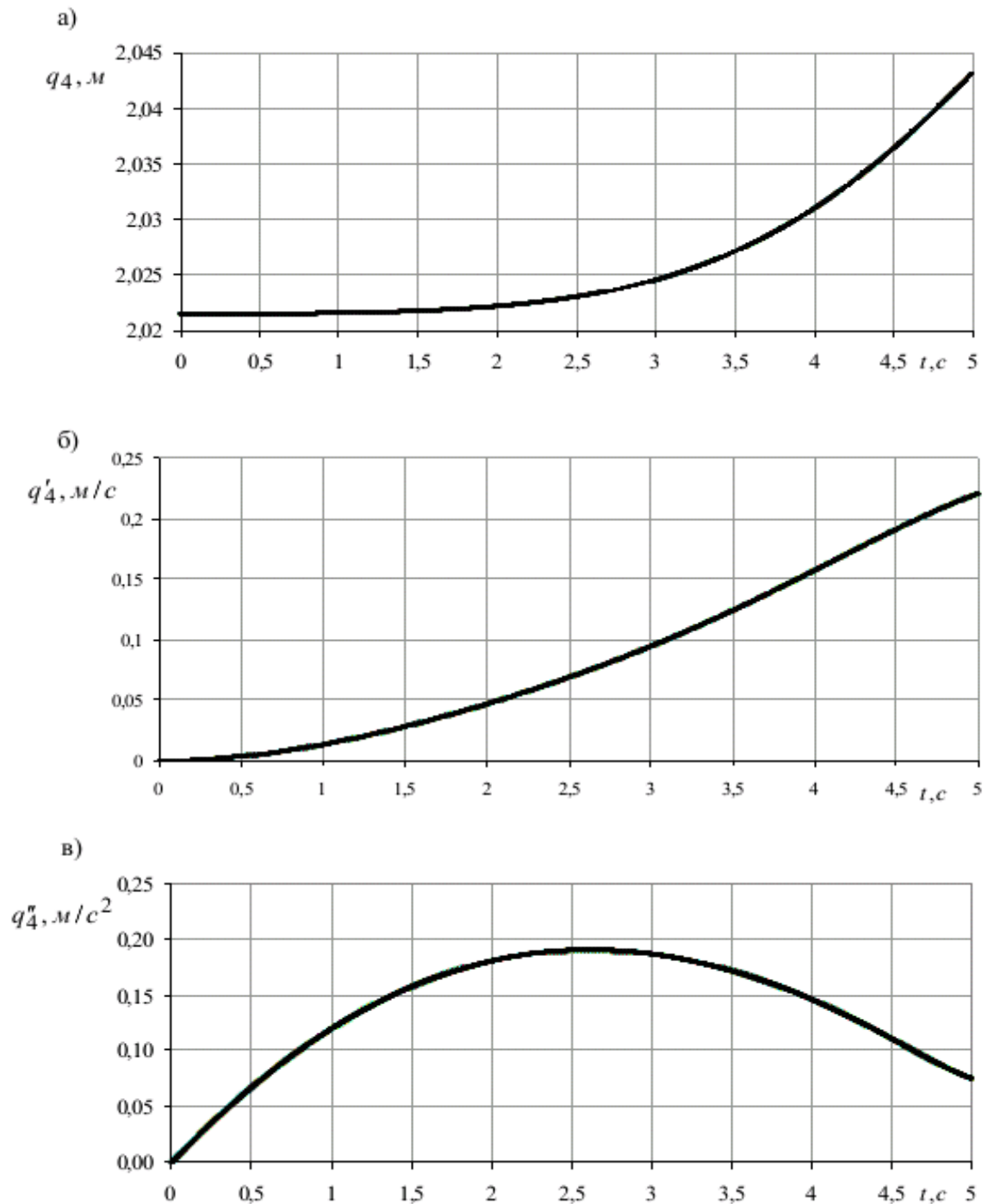


Рисунок 3.11 – Графіки перехідних процесів, які виникають при переміщенні вантажу вздовж осі OX_3 :
а – переміщення; б – швидкість; в – прискорення

схеми металоконструкції мостового крана, яке найточніше відображає справжню картину розподілу напружень в елементах металоконструкції крана і дозво-

ляє розглядати поєднання і місце для вкладання зовнішніх силових факторів, що дають найбільше навантаження на той чи інший елемент.

Проведення статичного кінцево-елементного аналізу ПДВ металоконструкції крана з використанням в якості граничних умов результатів розрахунку по динамічній моделі розглянуто в наступній роботі.

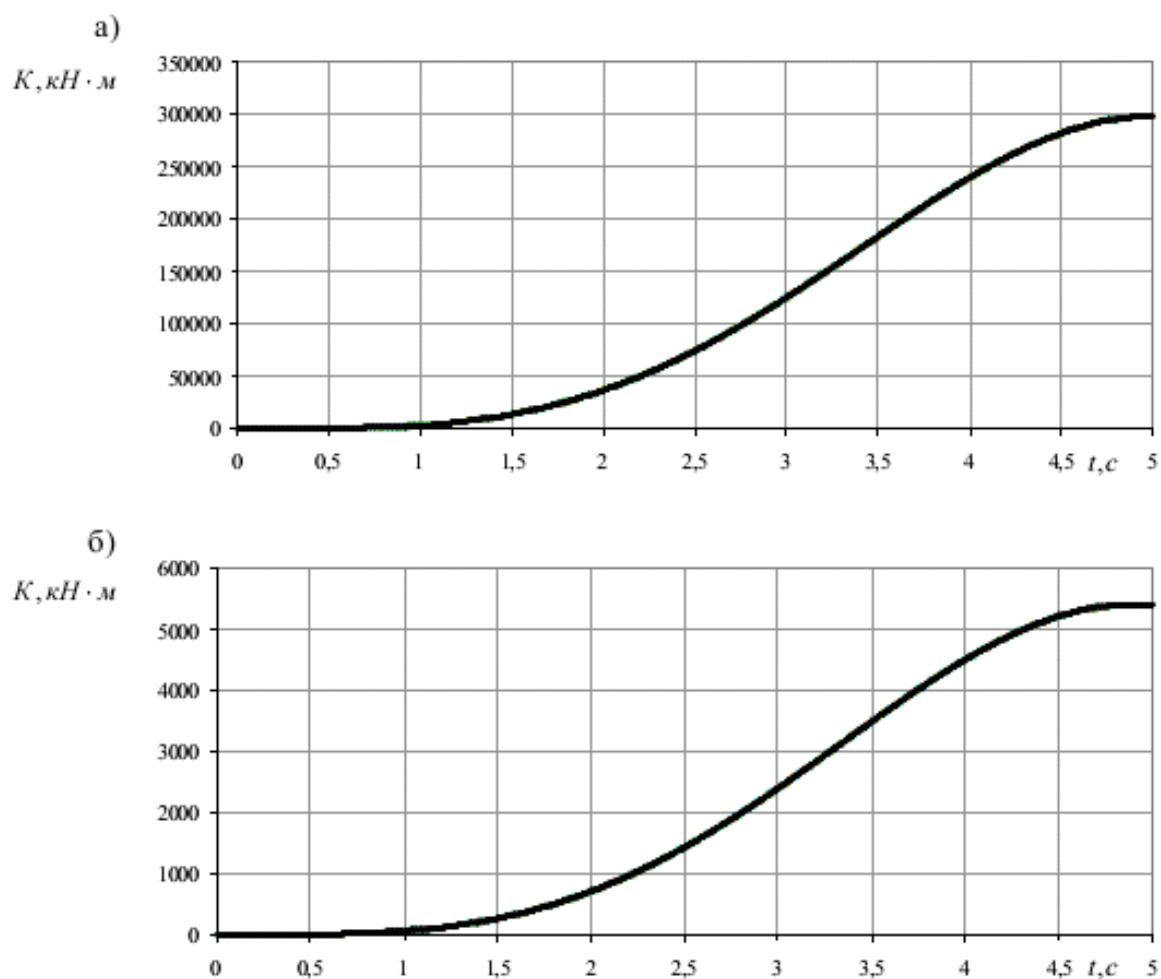


Рисунок 3.12 – Графік залежності кінетичної енергії яка витрачається, від часу під час переміщення: а – вантажного візка; б – вантажу

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ

1. Обґрунтовано узагальнену розрахункову схему мостового крана, що представляє собою систему з трьома масами, ланками якої є: міст крана, вантажний візок, крюкова обойма з вантажем. Для математичного опису механічної підсистеми використовуються чотири право-ортогональні системи координат, пов'язані відповідно з металоконструкцією крана, вантажним візком і самим вантажем. Для опису положення розрахункової точки механічної системи мостового крана в просторі прийняті три узагальнені координати.

2. Розроблено тривимірну модель моделюючого мостового крана в САД-системі SolidWorks, яка дозволила визначити чисельні значення координат центрів тяжіння і моментів інерції всіх ланок механічної системи мостового крана. Тривимірна модель дозволила отримати реалістичну анімацію просторових рухів механічної підсистеми мостового крана в процесі моделювання.

3. Представлена математична модель мостового крана реалізована в середовищі імітаційного моделювання SolidWorks Motion програмного комплексу SolidWorks. Розроблена імітаційна модель дозволяє досліджувати динаміку переміщення вантажного візка в тривимірному просторі.

4. Розроблена математична модель складної динамічної системи мостового крана дозволяє проводити теоретичні дослідження на ПК. Для розрахунків в математичну модель закладалися чисельні значення параметрів мостового крана вантажопідйомністю 20/5 т прольотом 22,5 м, однак розроблена модель може бути використана для дослідження динамічних процесів будь-якого мостового крана шляхом підстановки чисельних значень параметрів до відповідних блоків.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА ДИДАКТИЧНОГО ПРОЄКТУ ФАКУЛЬТАТИВНОГО ЗАНЯТТЯ З ТЕМИ «ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ МЕХАНІЗМУ ПЕРЕСУВАННЯ МОСТОВОГО КРАНА»

4.1. Постановка цілей факультативного заняття (оперативних цілей)

В таблиці 4.1 приведено оперативні цілі з теми.

Таблиця 4.1

Постановка цілей факультативного заняття (оперативних цілей)

Цілі факультативного заняття	Цілі формування різних рівнів засвоєння навчального матеріалу	Умови досягнення	Результат у вигляді дій студентів
1	2	3	4
Сформувані вміння називати, характеризувати та аналізувати Оптимізація технологічних параметрів робочого процесу механізму пересування візка мостового крану.	I рівень. Мати загальне уявлення про динамічні навантаження в вантажних візках. Називати особливості динамічних навантажень при пересуванні вантажних візків на колесах з гумовою вставкою.	Базові знання з дисципліни «Технологія автоматизованого виробництва» стосовно теми.	Визначено сутність особливостей динамічних навантажень при пересуванні вантажних візків на колесах з гумовою вставкою.

Продовження табл. 4.1

1	2	3	4
	II рівень. Уміти охарактеризувувати динамічні навантаження в вантажних візках на колесах з гумовою вставкою.	Виконання дій першого рівня.	Надано характеристику особливостям динамічних навантажень в вантажних візках на колесах з гумовою вставкою.
	III рівень. Аналізувати динамічні навантаження в вантажних візках на колесах з гумовою вставкою.	Визначення понять з теми	Проаналізовано динамічні навантаження в вантажних візках на колесах з гумовою вставкою.

4.2. Перелік літературних джерел з теми

Основні рекомендовані джерела

1. Фідровська Н. М. Визначення оптимальних параметрів ходових коліс мостових кранів / Н. М. Фідровська, Є. Д. Слепужніков // Науковий вісник будівництва: зб. наук. пр. – Х.: Харк. нац. ун-т будівництва та архітектури, 2012. – Вип. 69. – С. 215–222.

2. Фідровська Н. М. Визначення напруг у зоні контакту ходових коліс вантажного візка з рейками / Н. М. Фідровська, Є. Д. Слепужніков, І. С. Варченко // Машинобудування :зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад. – Х., 2013. – Вип. 11. – С. 72–75.

3. Фідровська Н. М. Визначення напружень в циліндричній трьохшаровій конструкції / Н. М. Фідровська, Є. Д. Слепужніков, О. В. Чернишенко // Машинобудування :зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад. – Х., 2014. – Вип. 14. – С. 59–63. (Здобувачем в аналітичній формі проведено розв'язання задач і напруженого стану трьохшарової циліндричної конструкції).

4. Фідровська Н. М. Міцність трьохшарової циліндричної оболонки /Н. М. Фідровська, Є. Д. Слепужніков, О. В. Чернишенко // Науковий вісник будівництва :зб. наук.пр. / Харк. нац. ун-т будівництва та архітектури – Х., 2015. – Вип. 1(79). – С. 190–193.

5. Фідровська Н. М. Динамічні навантаження при пересуванні ходових коліс з гумовими вставками / Н. М. Фідровська, Є. Д. Слепужніков, О. В. Чернишенко // Машинобудування :зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад. – Х., 2015. – Вип. 15. – С. 87–91.

6. Слепужніков Є.Д. Визначення динамічних навантажень при пересуванні вантажного візка мостового крана / Є.Д. Слепужніков // Машинобудування :зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед.акад. – Х., 2015. – Вип. 16. – С. 34–37.

4.3. Конструювання дидактичних матеріалів: аналіз структури навчального матеріалу факультативного заняття

План викладення теми: «Імітаційне моделювання робочих процесів механізму пересування мостового крана».

1. Загальні відомості про оптимізацію технологічних параметрів робочого процесу механізму пересування візка мостового крану.

2. Технологічні параметри робочого процесу механізму пересування візка мостового крану.

2.1 Навантаження при дії інерції.

2.2 Перекіс осей при русі вантажних візків.

2.3. Навантаження, що виникають при коливанні вагону.

3. Причини виникнення нестандартних ситуаціях, під час робочого процесу механізму пересування візка мостового крану.

4. Методи рішення нестандартних ситуаціях, під час робочого процесу механізму пересування візка мостового крану.

5. Вдосконалення механізму пересування візка мостового крану.

На малюнку 4.1 представимо структурно-логічну схему з теми «Імітаційне моделювання робочих процесів механізму пересування мостового крана».

.



Рис. 4.1 Структурно-логічна схема з теми «Імітаційне моделювання робочих процесів механізму пересування мостового крана»

4.4. Аналіз опорних умов навчання

В таблиці 4.2 приведено вибір опорних понять, визначення способів перевірки та формування опорних знань

Таблиця 4.2

Вибір опорних понять, визначення способів перевірки та формування опорних знань

Перелік опорних понять, законів, способів дії.	Назва дисциплін і тем, в яких формуються базові знання і дії.	Способи (методи, форми, засоби) перевірки рівня сформованості опорні знань і способів дій	Способи актуалізації або поповнення опорні знань і способів дій
1	2	3	4
Статичні навантаження, динамічні навантаження, знос, пружній елемент, амортизуючий елемент.	Фізика. Триботехніка. Теоретична механіка. Динаміка транспортних систем.	Усне фронтальне опитування, за допомогою контрольних питань: 1. Що розуміється під поняттям статичне навантаження? 2. Що розуміється під поняттям динамічне навантаження? 3. Що таке знос і яких видів він буває? 4. Які складові вантажних візків являються пружними елементами? 5. Що таке амортизатор і яка його роль?	Якщо базові знання знаходяться на незадовільному рівні, то необхідно нагадати головні аспекти шляхом нагадування та повторення.

4.5. Проектування мотиваційних технологій навчання

В таблиці 4.3 наведено способи реалізації мотивації.

Таблиця 4.3

Визначення способів реалізації мотивації

Способи реалізації мотивації	Зовнішня мотивація	Внутрішня мотивація
1	2	3
Вступна мотивація	<p>Доброго дня сьогодні у нас перше факультативне заняття на якому ми будемо поглиблено вивчати питання оптимізації технологічних параметрів робочого процесу механізму пересування візка мостового крану. Відвідавши факультативні заняття ви поглибите свої знання ,що допоможе вам здати екзамен і отримати бажаний вами запис в заліковій книжці. І якщо Ви не будите підтримувати дисципліну , чи вести себе не чемно , то отримати залік буде дуже важко. І як наслідок ви не будете отримувати стипендію. Тому не відволікаємося ,слухаємо і конспектуємо.</p>	<p>Знання які ви отримаєте при вивченні даної теми будуть потрібні в подальшій робочій діяльності і ви на робочому місці зарекомендуєте себе як високо кваліфікований спеціаліст. Адже наука не стоїть на місці і ці знання вам знадобляться для кращої адаптації в мінливому світі вашої професійної діяльності.</p> <p>А якщо ви зараз змарнуєте цей час на сумнівні заняття, розмови один з одним ,то в майбутньому отримавши відповідальну посаду ви можете не свідомо стати першопрчиною трагедії чи техногенної катастрофи. Тому уважно мене слухаємо і не відволікаємо один одного.</p>

4.6. Проєктування технології формування орієнтовної основи діяльності на факультативному занятті

Вибір методів, форм та засобів формування ООД наведено в таблиці 4.4

Таблиця 4.4

Способи формування ООД на факультативному занятті

Рівні засвоєння навчального матеріалу теми заняття	Форми	Методи	Засоби
1	2	3	4
I	Групова (індивідуальна)	Лекція-розповідь, ілюстрації, демонстрації.	Конспект лекцій, Презентація «Оптимізація технологічних параметрів робочого процесу механізму пересування візка мостового крану», макет мостового крану.
II	Групова (індивідуальна)	Лекція-розповідь, ілюстрації, демонстрації.	Конспект лекцій, презентація «Оптимізація технологічних параметрів робочого

Продовження табл. 4.4

1	2	3	4
			процесу механізму пересування візка мостового крану», макет мостового крану.
III	Групова (індивідуальна)	Лекція-розповідь, ілюстрації, демонстрації.	Конспект лекцій, презентація «Оптимізація технологічних параметрів робочого процесу механізму пересування візка мостового крану», макет мостового крану.
IV	Фронтальна	Пояснення, ілюстрація	Презентаційні слайди

4.7. Проєктування технології формування виконавчих дій на факультативному занятті

Вибір методів, форм та засобів формування виконавчих дій наведено в таблиці 4.5

Таблиця 4.5

Способи формування виконавчих дій з теми

Рівні засвоєння навчального матеріалу теми заняття	Форми	Методи	Засоби
1	2	3	4
I, II, III	Фронтальна	Закріплююча бесіда	Питання: 1.Пререлічіть і охарактеризуйте які види зносу найчастіше відбуваються в колесах при забіганні колеса? 2.В чому полягає суть застосування гумової вставки в колесі вантажного візка ? 3. Назвіть і охарактеризуйте переваги і недоліки застосування дворядних конічних підшипниківкасетного типу ?

4.8. Проектування контрольних дій з теми

При проектуванні технології формування КД слід визначити вид контролю у відповідності до етапів навчального процесу (характеристика видів контролю наведена таблиці), метод контролю (характеристика методів контролю наведена в таблиці та засоби контролю.

Вибір методів, форм та засобів формування контрольних дій наведено в таблиці 4.6

Таблиця 4.6

Засоби контролю з теми факультативного заняття

Рівні засвоєння навчального матеріалу теми заняття	Форми	Методи	Засоби
1	2	3	4
I, II, III	Фронтальне	Письмова контрольна робота за варіантами	Проаналізуйте існуючі варіанти збільшення довговічності роботи вантажних візків шляхом зменшення динамічних навантажень за допомогою: 1 Варіант. Використання гумових вставок. 2 Варіант. Використання конічних підшипників касетного типу. 3 Варіант. Використання гідропневматичних ресор Подумайте і зробіть висновки.

4.9. Розробка сценарію факультативного заняття

Сценарій навчання з теми заняття на тему: «Імітаційне моделювання робочих процесів механізму пересування мостового крана» наведено в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7

Сценарій навчання з теми заняття

№ п/п	Структурні елементи заняття	Зміст структурних елементів
1	2	3
1	Організаційний момент.	Вітання, перевірка зовнішньої обстановки в аудиторії перевірка відсутніх. Вітання викладача. Студенти підтверджують присутність у момент переклички, налаштовуються на здійснення навчальної діяльності.
2	Повідомлення теми і мети заняття.	Повідомлення теми заняття: «Імітаційне моделювання робочих процесів механізму пересування мостового крана». Мета: Сформувати вміння називати, характеризувати та аналізувати шляхи оптимізації технологічних параметрів робочого процесу механізму пересування візка мостового крану. Студенти фіксують тему, сприймають цілі, формують уявлення щодо результатів засвоєння матеріалу теми даного заняття.
3	Мотивація мети.	Повідомлення важливості вивчення даної теми: Знання які ви отримаєте при вивченні даної теми будуть потрібні в подальшій робочій діяльності і ви на робочому місці зарекомендуєте себе як високо кваліфікований спеціаліст. Адже наука не стоїть на місці і ці знання вам знадобляться для кращої адаптації в мінливому світі вашої професійної діяльності.

1	2	3
		отримавши відповідальну посаду ви можете не свідомо стати першопричиною трагедії чи техногенної катастрофи. Тому уважно мене слухаємо і не відволікаємо один одного.
3	Актуалізація опорних знань.	<p>Проведення усного фронтального опитування, за допомогою контрольних питань:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Що розуміється під поняттям статичне навантаження? 2. Що розуміється під поняттям динамічне навантаження? 3. Що таке знос і яких видів він буває? 4. Які складові вантажних візків являються пружними елементами? 5. Що таке амортизатор і яка його роль.? <p>Якщо студенти не одразу відповідають на питання, викладач коротко нагадує основні моменти по базовому матеріалу Студенти слухають питання, відповідають на них. Доповнюють відповіді друг друга</p>
4	Формування ООД.	<p>Викладач викладає новий матеріал за планом:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Загальні відомості про оптимізацію технологічних параметрів робочого процесу механізму пересування візка мостового крану. 2. Технологічні параметри робочого процесу механізму пересування візка мостового крану. 3. Причини виникнення нестандартних ситуаціях, під час робочого процесу механізму пересування

		візка мостового крану. 4. Методи рішення нестандартних ситуаціях, під
--	--	--

Продовження табл. 4.7

1	2	3
		час робочого процесу механізму пересування візка мостового крану. 5. Вдосконалення механізму пересування візка мостового крану. В ході викладу використано наступні методи та засоби: метод лекції з елементами пояснення, розповідь, ілюстрація. Сприйняття нової інформації, співвідношення її з наявними знаннями, розуміння, запам'ятовування, ведення конспекту.
5	Формування ВД.	Обговорення та аналіз процесу оптимізації технологічних параметрів робочого процесу механізму пересування візка мостового крану.
6	Формування КД.	Викладач видає студентам письове завдання.. Студенти відповідають на питання.
7	Підбиття підсумків.	Узагальнення засвоєного шляхом нагадування в узагальненому вигляді основних питань, розглянутих на занятті Відновлення в пам'яті основних моментів матеріалу заняття.

Висновки до розділу 4

В четвертому розділі магістерської кваліфікаційної роботи було розроблено дидактичний проєкт факультативного заняття з теми «Імітаційне моделювання робочих процесів механізму пересування мостового крану» для підготовки фахівців транспортної галузі. Були сформульовані цілі факультативного заняття, обрані літературні джерела з теми, проведено конструюван-

ня дидактичних матеріалів, аналіз структури навчального матеріалу факультативного заняття, розроблений план та структурно-логічна схема з теми «Імітаційне моделювання робочих процесів механізму пересування мостового крана», проаналізовані базові поняття, визначені способи перевірки та формування опорні знань, розробили характеристику і текст мотивації, використання якої доцільно при викладі навчального матеріалу, були спроектовані технології формування орієнтовної основи діяльності, виконавчих та контрольних дій на факультативному занятті, розроблений сценарій заняття.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

1. Визначено, описано, теоретично обґрунтовано та проаналізовано процес професійної підготовки фахівців транспортної галузі, розроблено дидактичний проект факультативного заняття з теми «Імітаційне моделювання робочих процесів механізму пересування мостового крана».

2. Сформульовано критерій ефективності процесу переміщення вантажного візка в просторі конфігурацій мостового крана, який спрямований на оптимізацію тривалості часу робочої операції по руху вантажного візка і динамічних навантажень при обмеженнях, що накладаються на певні параметри і характеристики роботи крана.

3. Встановлено функціональні залежності між основними масово-габаритними характеристиками крана і виникаючими в вузлах металоконструкції напруженнями і переміщеннями.

4. На основі регресійного аналізу статистичних даних основних параметрів конструктивних пристроїв механізму пересування отримані функціональні залежності маси крана, вантажного візка, електродвигуна, редуктора, а також крутного моменту на валу двигуна, потужності на швидкохідному валу редуктора, діаметра вала редуктора і ККД електродвигуна. Дані функціональні залежності дозволяють прогнозувати основні параметри пристроїв механізму пересування і оптимізувати їх при проектуванні нових конструкцій мостового крана.

5. Методика визначення основних параметрів механізму пересування мостового крана може бути використана в навчальному процесі закладів вищої освіти при підготовці бакалаврів та магістрів за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування. Запропоновано перспективні технічні рішення мостового крана, які можуть бути використані на кранобудівних підприємствах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Головенкін В. П. Інженерна педагогіка [Електронний ресурс] : підруч. / В. П. Головенкін. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. Режим доступу: http://psy.kpi.ua/wp-content/uploads/2017/02/Injenerna_pedagogika.pdf
2. Коваленко О. Е., Брюханова Н. О., Корольова Н.В. Методика професійного навчання: дидактичне проектування: Підручник для студентів інженерно-педагогічних спеціальностей. – Харків: УПА, 2019. – 204 с.
3. Коваленко О. Е., Брюханова Н. О., Корольова Н.В. Методика професійного навчання: основні технології навчання: Підручник для студентів інженерно-педагогічних спеціальностей. – Харків: УПА, 2019. – 174 с.
4. Лебедик Л.В., Стрельніков В.Ю., Стрельніков М.В. Сучасні технології навчання і методики викладання дисциплін: Навчально-методичний посібник для слухачів курсів підвищення кваліфікації педагогічних працівників закладів середньої, професійної (професійно-технічної), фахової передвищої та вищої освіти / Л. В. Лебедик, В. Ю. Стрельніков, М. В. Стрельніков. – Полтава : АСМІ, 2020. – 303 с.
5. Методика професійної освіти : навч. посібник для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 015 «Професійна освіта» галузі знань 01 «Освіта / Педагогіка» / Д. О. Чернишев, К. І. Почка, Г. Л. Корчова, Ю. С. Красильник, М. В. Руденко. – Київ : Компринт, 2024. – 224 с.
6. Методичні вказівки до виконання магістерської кваліфікаційної роботи для здобувачів освіти другого (магістерського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання за спеціальністю 015 Професійна освіта (за спеціалізацією) / Укр. інж.-пед. акад.; упоряд.: О. Е. Коваленко, Н. О. Брюханова, Н.В. Божко, Н.В. Корольова – Харків: УПА, 2024. – 82 с.
7. Освітньо-професійна програма «Професійна освіта (Машинобудування)» першого (бакалаврського) рівня. Затверджена вченою радою Української інженерно-педагогічної академії від 28.06.2024 року №13.

8. Освітньо-професійна програма «Професійна освіта (Машинобудування)» другого (магістерського) рівня. Затверджена вченою радою Української інженерно-педагогічної академії від 28.06.2024 року №13.
9. Семенова А.В. Професійна педагогіка: Підручник. / Авт. : О.В. Грабовський, Л.В. Коломієць, О.С. Савельєва, А.В. Семенова, В.Ф. Яні; за заг. ред. А.В. Семенової. – Одеса: Бондаренко М.О., 2020. – 575 с.
10. Сайт дистанційної освіти Університету – Режим доступу: <https://moodle.karazin.ua>
11. EdEra – студія онлайн-освіти [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ed-era.com/>
12. Український освітній онлайн-портал для вчителів «На Урок» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://naurok.com.ua/>
13. «Освіторія Медіа» – онлайн медія про освіта та виховання [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://osvitoria.media/>
14. Освіта.UA [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://osvita.ua>
15. Всеосвіта – освітня платформа для професійного зростання педагогічних працівників та підвищення їх педагогічної майстерності [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://vseosvita.ua/>
16. Щербаков В.С. Система автоматизованого моделювання стрілового вантажопідйомного крана: монографія / В.С. Щербаков, С.А. Зирянова, М.С. Коритов; СибАДИ. - Омськ: СибАДИ, 2009. - 104 с.
17. Коритов М.С. Автоматизація синтезу оптимальних траєкторій переміщення вантажів мобільними вантажопідймальними кранами в неоднорідному організованому тривимірному просторі: монографія / М.С. Коритов; СибАДИ. - Омськ: СибАДИ, 2012. - 380 с
18. Дьяконов В.П. Maple 9.5 / 10 в математиці, фізиці та освіті / В. П. Дьяконов. - М.: СОЛОН-Пресс, 2006. - 720 с.
19. Сухарев Е.А. Основи динаміки підйомно-транспортних і дорожньо-будівельних машин: Навчальний посібник. - Рівне: НУВГП, 2012. - 191 с.

20. Реброва І.А. Планування експерименту: навчальний посібник. - СибАДИ, 2010 - 106 с.
21. Будіков Л.Я. Дослідження впливу деяких факторів на динамічні навантаження металоконструкцій кранів. Дис. канд. техн. наук. - Ворошиловград, 1971. - 161 с.
22. Лобов Н.А. Динаміка вантажопідіймальних кранів. М .: Машинобудування, 1987. - 160 с.
23. Гохберг М.М. Металеві конструкції підйомно-транспортних машин / М.М. Гохберг. - 3-е изд., Перераб. і доп. - Л .: Машинобудування, 1976. - 456 с.
24. Вайнсон А.А. Підйомно-транспортні машини: навч. для вузів / А.А. Вайнсон. - 4-е изд., Перераб. і доп. - М .: Машинобудування, 1989. - 536 с.