

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Факультет(ННІ) _____ КОНСТРУЮВАННЯ ТА ДИЗАЙНУ _____

УДК 621.873

ПОГОДЖЕНО

Декан факультету (Директор ННІ)
конструювання та дизайну
(назва факультету (ННІ))

_____ Зіновій РУЖИЛО _____
(підпис) (ПІБ)

— ” _____ 2024 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри
конструювання машин і обладнання
(назва кафедри)

_____ Вячеслав ЛОВЕЙКІН _____
(підпис) (ПІБ)

— ” _____ 2024 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МЕХАНІЗМОМ
ПІДЙОМУ ВАНТАЖУ РОБОТИЗОВАНОГО БАШТОВОГО КРАНА

Спеціальність _____ 133 – Галузеве машинобудування _____
(код і назва)

Освітня програма _____ Робототехнічні системи і комплекси сільськогосподарського
виробництва _____
(назва)

Орієнтація освітньої програми _____ освітньо-професійна _____
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

_____ Д.Т.Н. професор _____
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис)

_____ Юрій РОМАСЕВИЧ _____
(ПІБ)

Керівники магістерської кваліфікаційної роботи

_____ Д.Т.Н. професор _____
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис)

_____ Юрій РОМАСЕВИЧ _____
(ПІБ)

_____ К.Т.Н. _____
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис)

_____ Віктор КРУШЕЛЬНИЦЬКИЙ _____
(ПІБ)

Виконав

_____ Закревський Богдан Віталійович _____
(підпис) (ПІБ студента)

КИЇВ – 2024

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Факультет(НИІ) _____ **КОНСТРУЮВАННЯ ТА ДИЗАЙНУ** _____

ЗАТВЕРДЖУЮ**Завідувач кафедри**

конструювання машин і обладнання

д.т.н., професор _____ Вячеслав ЛОВЕЙКІН
(науковий ступінь, (підпис) (ПІБ)
 вчене звання)

— ” _____ 2024 року

ЗАВДАННЯ

**ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ
ЗАКРЕВСЬКИЙ БОГДАН ВІТАЛІЙОВИЧ**

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

Освітня програма _____ Робототехнічні системи і комплекси сільськогосподарського
(назва) (назва)

виробництва _____

Орієнтація освітньої програми _____ освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської кваліфікаційної роботи РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ
МЕХАНІЗМОМ ПІДЙОМУ ВАНТАЖУ РОБОТИЗОВАНОГО БАШТОВОГО
КРАНУ

затверджена наказом ректора НУБіП України від —29— ” грудня 2023 р. № 2400-Є”

Термін подання завершеної роботи на кафедру _____ 2024.11.15
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи _____

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Аналіз літератури _____
2. Розробка систему керування _____
3. Охорона праці _____
4. Техніко економічне обґрунтування _____

Перелік графічного матеріалу (за потреби) _____

Дата видачі завдання — ” _____ р.

Керівники магістерської кваліфікаційної роботи _____ Ромасевич Ю. О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

_____ Крушельницький В.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання _____ Закревський Б.В.
(підпис) (прізвище та ініціали студента)

РЕФЕРАТ

Магістерська кваліфікаційна робота складається з пояснювальної записки, у якій міститься вступ, п'ять розділів, висновки, списку використаних джерел та додатків. Дана робота представлена на 79 аркушах друкованого тексту.

У першому розділі магістерської кваліфікаційної роботи виконано розгляд загальних відомостей про баштові крани, а також аналіз конструкцій механізму підйому вантажу. Також був проведений пошук пов'язаних наукових публікації та патентів існуючих конструкцій.

У другому розділі цієї роботи провели розробку оптимального керування механізмом підйому вантажу за допомогою LQR. Також проведено пошук оптимальних вагових коефіцієнтів для оптимального керування підйомом вантажу.

В третьому розділі наведені структурна та алгоритмічна схеми, що описують будову механізму підйому вантажу, який забезпечує впровадження оптимального програмованого керування за допомогою LQR. Крім цього були представлені приклади комплектуючих, що встановлюються в такому механізмі.

Четвертий розділ роботи демонструє проведення розрахунків економічної ефективності крана за умови використання оптимального керування механізму підйому в порівнянні із неоптимальним.

В п'ятому розділі наведені правила охорона праці при роботі з механізмом підйому, вантажем та краном та принципи запобігання небезпечних ситуацій, таких як небезпечний підйом.

Ключові слова: роботизований баштовий кран, система керування, механізм підйому вантажу, LQR, вантаж.

Зміст

РЕФЕРАТ	3
ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИХ ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ	7
1.1 Загальні відомості про виконання технологічних операцій роботизованим баштовим краном	7
1.2 Особливості експлуатації механізму підйому вантажу	10
1.3 Кількісний аналіз публікацій.....	16
1.4 Змістовний аналіз публікацій.....	19
1.5 Аналіз патентних документів.....	21
РОЗДІЛ 2. ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ МЕХАНІЗМУ ПІДЙОМУ ВАНТАЖУ	25
2.1 Постановка задачі оптимального керування	25
2.2 Розв’язання задачі оптимального керування	28
2.2.1 Методика розв’язання задачі	28
2.2.2 Приклади розв’язання задачі	31
2.3 Аналіз отриманих результатів.....	40
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА СХЕМИ СИСТЕМИ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ МЕХАНІЗМОМ ПІДЙОМУ ВАНТАЖУ	44
3.1 Розробка структурної схеми системи керування	44
3.2 Розробка рекомендацій стосовно апаратної частини системи (датчики, керовані приводи, мікроконтролери)	46
3.3 Розробка алгоритмічної частини роботи системи.....	58
РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ПРОЕКТУ	61

4.1 Фактори, які впливають на підвищення ефективності виконання технологічних операцій	61
4.2 Розрахунок економічної ефективності від застосування системи оптимального керування	63
РОЗДІЛ 5. ПРАВИЛА ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ	66
5.1 Класифікація небезпечних факторів під час виконання технологічних операцій	66
5.2 Заходи техніки безпеки.....	68
ВИСНОВКИ.....	72
Висновки будуються по пунктам. У висновки необхідно додати основні чисельні характеристики (декілька). У висновках пишуть не про те, що зроблено, а про те, що означає для практики і науки отримані результати	
.....	Ошибка! Закладка не определена.
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	73
ДОДАТКИ.....	78

ВСТУП

Через зростання ефективних та безпекових вимог в будівництві відбувається стимуляція активного розвитку автоматизованих та роботизованих систем управління баштовими кранами. Використання таких систем у керуванні підйомним механізмом не тільки знижує рівень впливу людського фактору, а й дозволяє оптимізувати процеси переміщення вантажів. Таку тенденцію підкреслює наявність великої кількості актуальних досліджень, направлених на розробку систем керування механізмом підйому для роботизованих баштових кранів, що підвищує ефективність роботи.

Метою даного дослідження є розробка та оптимізація системи керування механізмом підйому вантажу роботизованого баштового крана за допомогою LQR-регулятора, що здатна забезпечити стабільність вантажу під час підйому та спуску, точність переміщень та зменшення ризиків небажаних коливань.

Об'єктом дослідження є процес підйому вантажу роботизованим баштовим краном, а предметом – система керування.

Методи дослідження включають теоретичний аналіз та комп'ютерне моделювання в середовищі Wolfram Mathematica для створення регулятора та перевірки вагових коефіцієнтів системи.

Загалом, дані методи та підходи до розробки системи керування роботизованим баштовим краном націлені на підвищення ефективності будівельних процесів, що підкріплює актуальність проведеного дослідження.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИХ ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ

1.1 Загальні відомості про виконання технологічних операцій роботизованим баштовим краном

Взагалі, баштовий кран — поворотний кран стрілового типу, що має закріплену у верхній частині вертикально стрілу [1], який призначений для переміщення вантажу.

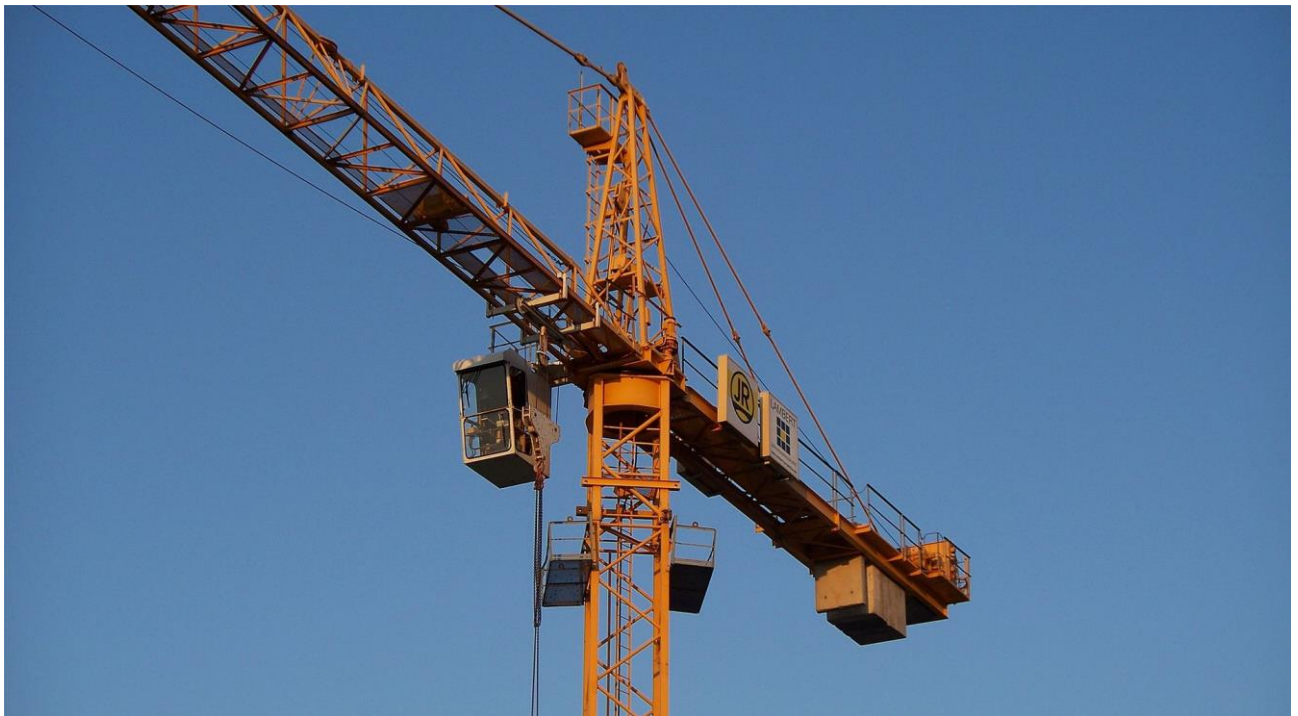


Рисунок 1.1 – Баштовий кран

Всі баштові крани складаються з однакових основних частин:

Основа прикріплена до великої бетонної плити, яка підтримує кран. Основа з'єднується зі щоглою (або вежею), що надає баштовому крану його висоту. До верхньої частини щогли прикріплені поворотний вузол — редуктор і двигун, — який дозволяє башті крана обертатися. Зверху поворотного вузла знаходяться три частини [2]:

- Довга горизонтальна стріла (або робоча стріла) — це частина крана, яка переносить вантаж. Візок проходить уздовж стріли для переміщення вантажу.
- Коротша горизонтальна стріла машини містить двигун крана, який піднімає вантаж, разом із керуючою електронікою, яка його приводить в дію і кабельним барабаном. Також там утримуються великі бетонні противаги;
- Кабіна оператора – це місце, де сидить кранівник, що контролює рухи крана;



Рисунок 1.2 – Кабіна оператора розібраного крана



Рисунок 1.3 – Поворотний механізм

На крані використовуються два обмежувальні перемикачі, щоб переконатися, що оператор не перевантажує кран;

1) Перемикач максимального навантаження контролює натягування троса та гарантує, що навантаження не перевищує допустиме значення.

2) Перемикач навантажувального моменту гарантує, що оператор не перевищить номінальний тоннаж крана під час переміщення навантаження на стрілу. Вузол в поворотному блоці може виміряти ступінь згортання стріли та визначити, коли виникає стан перевантаження.

Роботизовані баштові крани виконують технологічні операції з підйому, переміщення та розміщення вантажів на будівельних майданчиках як і звичайні. Завдяки автоматизованій системі керування вони забезпечують високу точність переміщення та стабільність роботи, що необхідно під час будівництва багатоповерхових об'єктів або в умовах обмеженого простору.

Роботизований баштовий кран в порівнянні зі звичайним має багато переваг за рахунок своєї оснащеності.

Для точного контролю за вагою та розташуванням вантажу під час підйому вантажу використовуються системи анти-коливального керування та здатні плавно рухати вантаж по вертикалі та точно позиціонувати його в заданому місці. Це важливо при монтажі панелей, блоків або інших великих будівельних елементів.

Щоб переміщувати вантаж по горизонталі та повертаючи стрілу, роботизовані крани часто оснащуються системами активного керування, які розраховують оптимальну траєкторію з урахуванням динамічних характеристик вантажу і навколишніх умов для точного позиціонування вантажу на будівельному майданчику.

Роботизовані баштові крани значно підвищують продуктивність і безпеку операцій за рахунок автоматизованого керування і зменшення впливу людського фактору за рахунок оснащення різними датчиками та системами.

1.2 Особливості експлуатації механізму підйому вантажу

Механізм для підйому вантажу містить такі складові: двигун, гальма, редуктор, муфти та барабан. Далі запропоновані закордонні екземпляри механізмів, які можна придбати в інтернеті [3] та готових до установки

Компонування механізму на рамі залежить від вибору редуктора. Гальма на приводі можуть бути колодковими або дисковими. Іноді на двигуні встановлюють вентилятор із окремим двигуном меншої потужності для охолодження.



Рисунок 1.4 – Підйомний механізм 60QP25HS-G3

У даному механізмі (Рисунок 1.4) використовують циліндричний редуктор з декількома виходами на ведучому валу для розміщення гальм з іншої від двигуна сторони.



Рисунок 1.5 – Підйомний механізм 60QP25HS

В цьому механізмі (Рисунок 1.5) характерною особливістю є використання дискових гальм.



Рисунок 1.6 – Підйомний механізм 40QP20HS



Рисунок 1.7 – Підйомний механізм 100QFK35-G1



Рисунок 1.8 – Підйомний механізм 45JLF25A

Дані два екземпляри (Рисунок 1.7, Рисунок 1.8) особливі використанням кінцевих редукторів.



Рисунок 1.9 – Підйомний механізм 25PC13

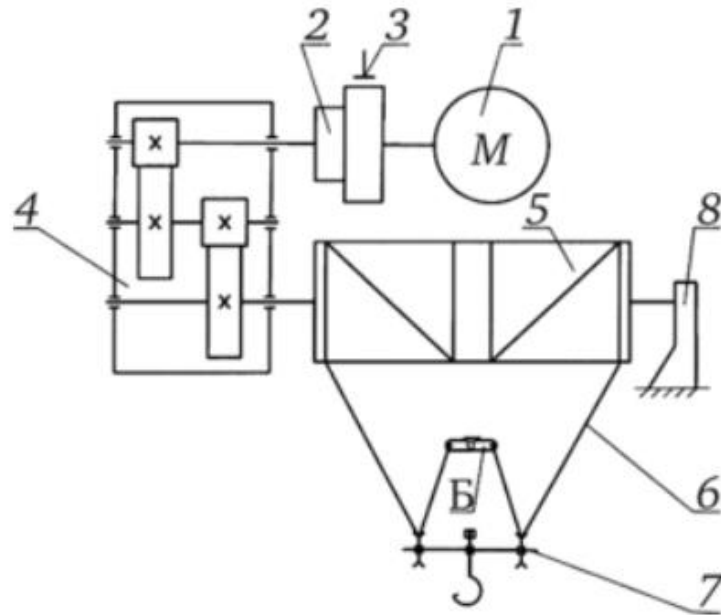


Рисунок 1.10 – Кінематична схема підйомного механізму баштового крана, де 1 – електродвигун; 2 – пружна муфта; 3 – гальма; 4 – редуктор; 5 – барабан; 6 – канат; 7 – гакова підвіска; 8 – кріпильна опора барабана.

Електродвигун у поєднанні з редуктором, з'єднані за допомогою муфти та гальма, є руховою частиною механізму підйому. Барабан, закріплений на опорі та з'єднаний з гаковою підвіскою через гнучкий елемент у вигляді каната, являють собою робочу частину механізму підйому.

Барабан – це робочий орган механізму підйому. Він служить для одношарової та багатошарової навивки каната.

За конструктивною ознакою розрізняють два типи барабанів:

- барабан із гладкою поверхнею;
- барабан з поверхнею, виконаною у вигляді гвинтової канавки.

Барабани, які працюють як з канатом, так і з ланцюгом, з обох боків мають борти (реборди). Барабани, забезпечені пристроєм, що виключає сходження каната з барабана, виготовляють, як правило, без реборд.

Канавки, розташовані на поверхні барабана по гвинтовій лінії, забезпечують велику поверхню контакту каната і барабана. При цьому

зменшуються напруження змінання. Тому при використанні нарізаних барабанів термін служби каната збільшується.

Барабани виготовляються литтям із сталі або чавуну, а також зварюванням заготовок із сталі. Стінки барабана відчувають складну напругу стиснення, кручення та вигину.

Частотний перетворювач для кранів – один з найважливіших елементів модернізації. Його завдання – підвищення ефективності, продовження терміну служби техніки і скорочення витрат на її утримання. Взагалі, існують спеціальні серії перетворювачів для кранів, що захищені від впливу зовнішнього середовища та можуть безпечно використовуватись на вулиці.

Далі можна побачити декілька прикладів кранових частотних перетворювачів різних виробників [4], [5].



Рисунок 1.11 – Частотний перетворювач для крана SPLC-CV20-250G4



Рисунок 1.12 – Частотний перетворювач EM-11

1.3 Кількісний аналіз публікацій

Для дослідження нагальності та актуальності обраної теми, мною був проведений кількісний аналіз публікацій в англomовних наукових журналах через сервіс Scopus за декількома запитами.

Перший запит tower crane показав кількість статей, що були опубліковані кожного року протягом останніх 5 та пов'язані із баштовими кранами. За отриманими значеннями вийшла така гістограма (Рисунок 1.13), що демонструє зацікавленість в даному питанні



Рисунок 1.13 – Гістограма кількості статей про баштові крани

Далі проводився пошук за запитом *hoisting mechanism* для пошуку статей зв'язаних із механізмом підйому вантажу. За результатами пошуку по роках була створена наступна гістограма (Рисунок 1.14), що показує зростання та має перспективи розвитку.

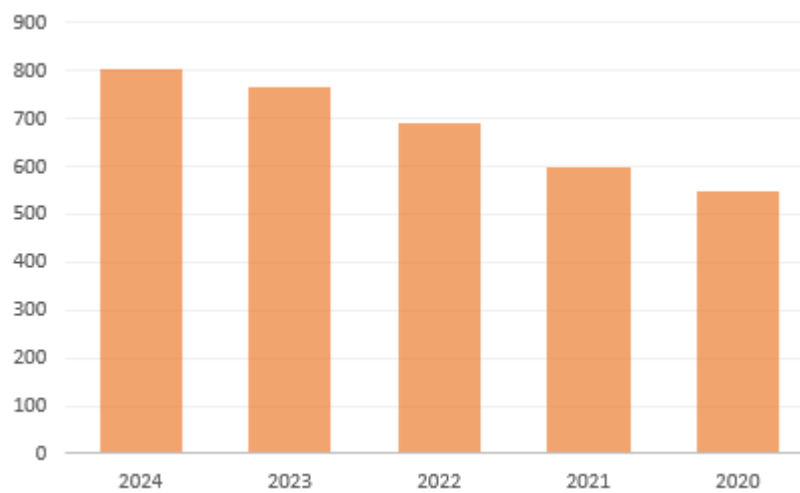


Рисунок 1.14 – Гістограма кількості статей про механізм підйому вантажу

Третім запитом на пошук було керування механізмом підйому вантажу (*control of the hoisting mechanism*). Після створення відповідної гістограми (Рисунок 1.15) за кількістю статей можна помітити збільшення числа публікацій та актуальність даної теми.

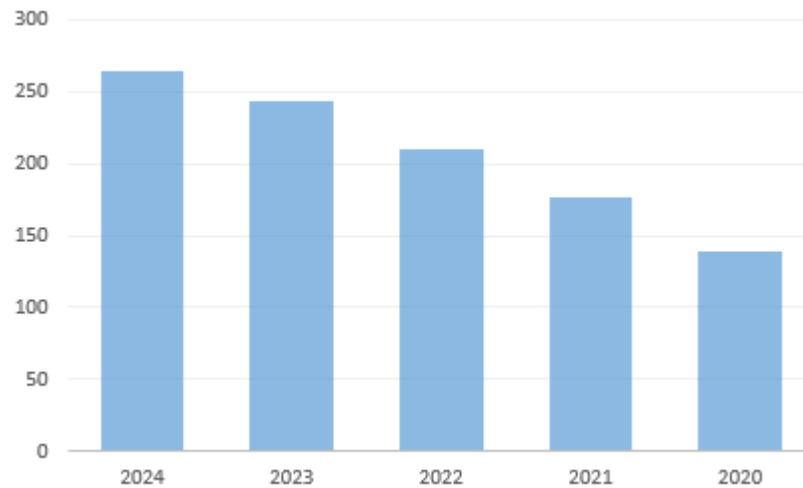


Рисунок 1.15 – Гістограма кількості статей про керування механізмом підйому вантажу

Четвертий і останній запит стосується *optimal control of the hoisting mechanism*, тобто оптимального керування механізмом підйому. В даному напрямку кількість статей значно менша ніж при попередніх запитах, але тенденція теж в напрямку зростання, що можна побачити на даній гістограмі (Рисунок 1.16).

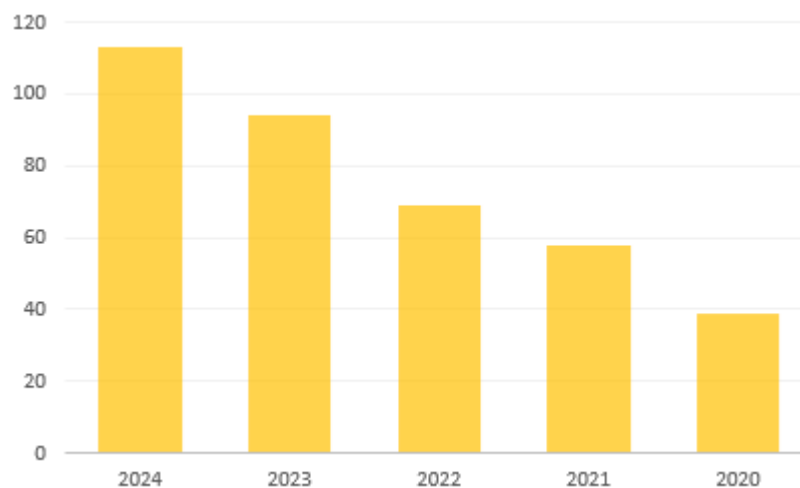


Рисунок 1.16 – Гістограма кількості статей про оптимальне керування механізмом підйому вантажу

Отже, результат цього аналізу є розуміння того, що тема оптимального керування краном зараз досить актуальна та затребувана в процесі будівництва або звичайного переміщення вантажів.

1.4 Змістовний аналіз публікацій

Для дослідження питання, що вирішується, я провів аналіз наукових публікацій та журналів, де публікуються статті. Знайдені роботи мають схожі теми, а отже дають можливість поглянути, як мислять інші науковці та на їх методи дослідження.

Першою згадаю роботу, де для керування тривимірною крановою системою розробляється контролер за допомогою μ -синтезу [6]. Спочатку для регулятора нелінійні рівняння лінеаризуються навколо точки рівноваги, далі розраховуються вагові коефіцієнти. Зазначено, що запропонований контролер задовільняє цілі керування на оригінальній системі та стійким до параметричних невизначеностей. Крім цього, вказано, що дане керування показує кращі результати в порівнянні з контролером ковзного режиму через менші сили керування, а через відсутність потреби отримання зворотнього зв'язку про рівень швидкості може отримати перевагу через застосування дешевших датчиків.

Наступною роботою, що я аналізував [7] стало підвищення продуктивності механізму підйому шляхом використання нової конструкції редуктора, в якого кожен ступінь складається з центральної шестерні, проміжних коліс, осей в корпусі та коліс із внутрішнім зачепленням. Через використання пар шестерень з різним передаточним числом, зменшуються динамічні навантаження на систему та її габарити.

В третій проаналізованій публікації [8] автори використали метод лінеаризації для перетворення моделі номінальної динаміки двигуна в дві роз'єднані підсистеми лінійної швидкості, щоб дозволити системі приводу

підйомного двигуна крана швидко відстежувати крутний момент навантаження. Для підсистем швидкості було розроблено два активних контролери погашення завад (ADRC) з ідентичною структурою. Порівнювали замкнуту систему з ADRC і систему з розімкненою системою. Коли двигун плавно працював при різних швидкостях навантаження і раптово було застосовано номінальне навантаження, діапазон коливань електромагнітного моменту не перевищував 20 Н·м. Система ADRC могла точно оцінити невідому модель підсистеми та адаптуватися до змін параметрів опору статора двигуна та ротора в діапазоні $\pm 10\%$.

У наступній роботі [9] запропоновано формувач вхідного сигналу з адаптивною схемою для керування механізмами повороту, змінною вильоту та підйому вантажу шляхом його здатності адаптувати та оновлювати параметри формувача похідної нульової вібрації в режимі реального часу відповідно до змін у параметрах системи. Це досягається за допомогою нелінійного відображення входу-виходу параметрів, розробленого за допомогою нейронної мережі. Експериментальні результати показують, що запропонований алгоритм стійкий до невизначеності параметрів з низьким коливанням загального та залишкового корисного навантаження. Його перевага підтверджується покращенням в порівнянні з надійним Extra Insensitive формувачем, розробленим із використанням середньої робочої частоти. Крім того, на продуктивність запропонованого контролера не впливають коливання мас корисного навантаження та швидкості руху.

В п'ятій праці [10] предметом дослідження є модель, яка застосовується для збору енергії руху в підйомному механізмі крана для живлення незалежних вимірювальних пристроїв. Чисельні експерименти були зосереджені на обраному пристрої збирання енергії руху (M-EHS) та його конфігураційних властивостях у контексті ефективності у випадку використання його на крані. У статті проведено порівняння енергоефективності для обраної конструкції та параметрів збирача для питомої швидкості підйому та довжини плеча системи

перетворення руху. Тим не менш, конструкція дозволяє пристосуватися до заданих умов шляхом налаштування M-EHS на задану частоту збудження та умови роботи.

Зі швидким розвитком технологій автоматизації традиційні процеси стають неактуальними, що підвищує попит на інтелектуальне управління підйомною технікою. Завдяки інтелектуальним системам підйомна техніка може застосовуватися в різних сферах для автоматизованої роботи без участі людини. Алгоритм мурашиних колоній дозволяє ефективно вирішувати задачу уникнення перешкод, визначаючи найкоротший маршрут для роботи в сітковому середовищі. У статті [11] проаналізовано режим роботи підйомної техніки, алгоритм мурашиних колоній та симуляцію роботи системи.

1.5 Аналіз патентних документів

Наступним етапом роботи є аналіз існуючих патентів, що містять схожі з моєю темою принципи. Пошук відповідної документації проводився на сайті європейського патентного агентства англійською мовою.

Перший винахід [12] забезпечує безпілотну систему управління баштовим краном і безпілотний спосіб управління. Система баштового крана автономно збирає дані про стан роботи баштового крана та навколишнє середовище та генерує план шляху для керування роботою баштового крана, щоб вирішити проблему низького рівня ефективності баштового крана в попередньому рівні техніки.

Другий патент [13] описує інтелектуальну систему керування баштовим краном та її інтеграцію за допомогою засобів інформаційних технологій і не є знімними, так що розумна робота та інтелектуальне уникнення перешкод у межах діапазону калібрування баштового крана реалізуються, вартість експлуатації та потенційна загроза безпеці зменшується, а ефективність підйому баштового крана покращується.

Наступний винахід [14] розкриває спосіб оптимізації траєкторії роботи групи кранів та пропонує техніку автоматичного керування баштовими кранами маючи на меті вирішити проблему підвищення небезпеки роботи декількох баштових кранів та покращення загальної ефективності роботи. Додатково на корпусі розташована камера і використовується для моніторингу; інтелектуальний термінал керування містить ручний термінал інтелектуального керування та пристрій тривимірного голографічного зображення.

В четвертому патенті [15] представлений винахід ефективного підйому об'єктів баштовим краном, який забезпечує зручність в експлуатації. Спосіб включає калібрування кутів повороту крана та залучення вимірювальних пристроїв, а також використання інфрачервоного далекоміра для налаштування на підйомне кільце. Система гарантує стабільність і точність підйому, а також зберігає енергію.

Винахід, представлений в п'ятій публікації [16], розкриває пристрій керування механічним баштовим краном, що включає контролер, модулі сигналізації, трансформатора струму та RS485 комунікації. Головний контролер під'єднаний до модулів сигналізації, сенсора кута, дисплея, пристроях зберігання даних, енкодера та управління живленням. Перетворювач змінного струму також під'єднаний до механізмів підйому, обертання та зміни вильоту. Завдяки оптимальному контролю швидкості і тривимірній координації забезпечується висока ефективність роботи, що допомагає оператору досягати безпечної та ефективної роботи крана з контролем коливань.

Корисна модель в наступному патенті [17] розкриває систему автопілоту баштового крана, яка включає бездротовий комунікаційний модуль. Кабіна обладнана системою автоматичного керування, що з'єднується з наземним контролером. Завдяки системі, електромеханічні механізми крана автоматично слідує заданому маршруту без потреби у GPS чи GNSS, а підйомний гак рухається між точками складування матеріалу та місця, де він потребується на будівництві.

В цій публікації [18] розкрито автоматичний метод підйому і транспортування для баштового крана, що включає побудову тривимірної моделі будівельного майданчика з генерацією набору вузлів і визначенням початкової та кінцевої точок. Метод створює маршрут підйому та транспортування і генерує відповідні параметри роботи. Переміщуючи об'єкт система розраховує амплітуду коливання та можливість перешкоди, а також прогнозує ймовірність перекидання крана. Це забезпечує автоматизовану роботу крана, запобігаючи зіткненням.

Винахід [19] описує інтелектуальний метод керування баштовим краном, який допомагає водієві планувати маршрут та надає операційні інструкції для високоточної роботи. Метод базується на моніторингу в режимі реального часу та автоматичному плануванні траєкторії руху гака та цільової точки, а його швидкість регулюється за допомогою ПЛК на основі даних сенсорів. Для зручності оператора розрахований маршрут і рекомендації відображаються на екрані.

Основою винаходу [20] є автоматичний метод керування на основі співпраці людини і машини та включає визначення та корекцію помилок позиціонування при ручному керуванні з компенсацією відхилень для оптимального управління. Автоматичне керування враховує втручання ручних команд, що дозволяє знизити коливання вантажу. Це все покращує ефективність, стабільність і безпеку роботи баштового крана.

Система, яка описана в цьому документі [21], містить прилад для оптимізації ресурсів для визначення оптимального маршруту з мінімальним споживанням ресурсів, враховуючи параметри прискорення, гальмування та зменшення коливань. Маршрут поділений на сегменти, кожен із яких має початкову та кінцеву секції з відповідними параметрами для безпечного руху. Транспортування вантажу відбувається згідно з оптимальним розрахованим маршрутом, обраним з мінімальним споживанням ресурсів.

Загалом, проаналізувавши патенти, що опубліковані в європейському патентному агентстві, можна дійти висновку, що системи допомоги в роботі з кранами або автоматичного керування вже розробляються та застосовуються у будівництві.

РОЗДІЛ 2. ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ МЕХАНІЗМУ ПІДЙОМУ ВАНТАЖУ

2.1 Постановка задачі оптимального керування

Для реалізації задачі оптимального керування механізмом підйому вантажу необхідно забезпечити переміщення вантажу з мінімізацією коливань і енергетичних витрат. Основною метою є розробка алгоритму керування, що забезпечує точне позиціонування вантажу з урахуванням таких обмежень, як габарити вантажу, динамічні зусилля, а також ефективність роботи механізму.

Для дослідження переміщення баштового крана можна використати двомасову динамічну модель стрілового крана (рисунок 2.1). Така модель дасть змогу досліджувати динаміку переміщення зведених мас та визначити зусилля в стріловій балці крана.

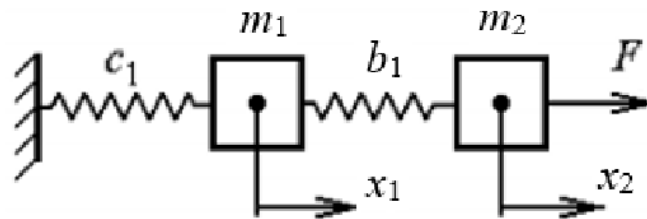


Рисунок 2.1 – Двомасова динамічна модель механізму підйому

Диференціальні рівняння коливань такої системи без врахування сили тертя представимо так

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + c_1(x_1 - x_2) + b_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = F; \\ c_1(x_1 - x_2) + b_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = m_2(\ddot{x}_2 + g). \end{cases} \quad (2.1)$$

В цій динамічній моделі m_1 та m_2 зведені маси стріли з приводом та кранової стріли з візком і вантажем. Зведена маса приводу і стріли з'єднана зі

зведеною масою кранової стріли з візком і вантажем пружним елементом з жорсткістю b_1 . До маси приводу і стріли прикладено рушійне зусилля F та силу опору переміщенню крана. Узагальнені координати мас кінцевих балок з приводом і мостової балки з візком та вантажем позначені x_1 та x_2 .

Для цієї системи задаються такі крайові умови

$$\begin{cases} t = 0; x_1 = 0; x_2 = 0; \dot{x}_1 = 0; \dot{x}_2 = 0; \ddot{x}_1 = 0; \ddot{x}_2 = 0; F = 0; \\ t = t_1; x_1 = x_1(t_1); x_2 = x_2(t_1); \dot{x}_1 = \dot{x}_1(t_1); \dot{x}_2 = \dot{x}_2(t_1); \ddot{x}_1 = \ddot{x}_1(t_1); \ddot{x}_2 = \ddot{x}_2(t_1); F = F(t_1). \end{cases} \quad (2.2)$$

Необхідно забезпечити контроль параметрів підйому, тобто вибір оптимальних параметрів маси вантажу та довжини гнучкого підвісу, що враховують динамічні властивості вантажу і запобігають його коливанням, а також коефіцієнтів лінійно-квадратичного регулятора, для зниження енергоспоживання за рахунок вибору режимів роботи, які мінімізують використання енергії.

Задача оптимізації системи руху механізму підйому проводиться за допомогою LQR-регулятора. Даний спосіб дає можливість отримати значення похибки від базового значення, яке виникає в процесі оптимізації. На допомогу в даному випадку приходять вагові коефіцієнти, що допоможуть зменшити значення похибки, а отже отримати бажаний результат.

Для постановки задачі оптимально керування застосуємо критерій якості керування:

$$J = \int_0^{\infty} (X^T Q X + u^T R u) dt \rightarrow \min \quad (2.3)$$

Q та R – матриці вагових коефіцієнтів, які показують важливість мінімізації величин змінних стану системи та керування відповідно; t – час.

Матриці Q та R не повинні бути від'ємними ($Q > 0$ та $R > 0$). Матриця R у випадку скалярного керування u є скаляром. Величина цього скаляра показує

важливість мінімізації керування. Матриця Q , як правило, є діагональною матрицею розмірності $N \times N$.

$$Q = \begin{bmatrix} q_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_N \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$q_1, q_2 \dots q_N$ – вагові коефіцієнти, які показують важливість мінімізації відповідних складових у інтегральному критерії J .

Для того, щоб знайти LQR-регулятор необхідно розв'язати наступне матричне рівняння Ріккати:

$$A^T P + PA + Q - PBR^{-1}B^T P = 0 \quad (2.5)$$

де P – матриця-розв'язок рівняння Ріккати.

$$\begin{array}{cccc} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{c_1}{m_1} & \frac{c_1}{m_1} & -\frac{b_1}{m_1} & \frac{b_1}{m_1} \\ \frac{c_1}{m_1} & -\frac{c_1}{m_1} & \frac{b_1}{m_1} & -\frac{b_1}{m_1} \end{array} \quad \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{m_1} \\ 0 \end{array} \quad (2.6), (2.7)$$

а)

б)

а) – матриця A та б) – матриця B . Ці матриці залежать від параметрів динамічної системи.

Розв'язуючи рівняння Ріккати, підставляючи вагові коефіцієнти, необхідно знайти щось середнє між мінімальним часом перерегулювання, мінімальною вживаною потужністю та мінімальним часом виходу на номінальну швидкість. Ця задача і лягає на мої плечі.

2.2 Розв'язання задачі оптимального керування

2.2.1 Методика розв'язання задачі

Розв'язання задачі оптимізації керування механізмом підйому вантажу проводиться у середовищі Wolfram Mathematica. Там ж і моделюється динамічна двомасова модель даного механізму, що в матричному вигляді матиме такий вигляд:

$$\left(\begin{array}{cccc|c} \emptyset & \emptyset & 1 & \emptyset & \emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \emptyset & 1 & \emptyset \\ \hline c_1 & c_1 & -b_1 & b_1 & 1 \\ m_1 & m_1 & -m_1 & m_1 & m_1 \\ \hline c_1 & c_1 & b_1 & -b_1 & \emptyset \\ m_2 & m_2 & m_2 & -m_2 & \emptyset \\ \hline \emptyset & 1 & \emptyset & \emptyset & \emptyset \end{array} \right) s \quad (2.15)$$

де c_1 – зведена жорсткість системи; m_1 – зведена маса механізму підйому вантажу; m_2 – маса вантажу; b_1 – жорсткість канату.

Ці значення будуть змінюватись залежно від варіанту задачі, який буде чотири. Для початку маса вантажу 200 кг, довжина гнучкого підвісу 2 м. В наступному варіанті довжина гнучкого підвісу збільшується до 12 м, а маса вантажу залишається 200 кг. В третьому довжина підвісу 12 м, але маса зростає до рівня 8000 кг. В крайньому варіанті довжина та маса матимуть значення в 12 м 200 кг відповідно. Ці зміни в заданих параметрах системи дозволять підібрати коефіцієнти регулятора для кожного випадку та сформулювати оптимальне керування механізмом.

При зміні довжини гнучкого підвісу, буде змінюватись значення c_1 , а разом із ним і значення b_1 .

Далі підбираються вагові коефіцієнти LQR-регулятора для чотирьох випадків з різними довжинами гнучкого підвісу та масами вантажу. Початково, їх значення встановлюються таким чином: коефіцієнт $\delta R = 5 \cdot 10^{-7}$, позиційний коефіцієнт $\delta P = 10^{-5}$, а швидкісний коефіцієнт $\delta V = 10^5$. Швидкісний та

позиційний коефіцієнти є ваговими складовими інтегрального критерію оптимізації регулятора. Шляхом їх підбору необхідно добитись того, щоб:

- 1) перегулювання швидкості крана не було великим, а в ідеалі нульовим;
- 2) піки споживаної потужності були мінімальними;
- 3) перехідний процес (вихід швидкості крана на номінальний рівень) не був довгим.

Дані вимоги не можуть бути задоволені в повній мірі разом, тому потрібно знайти компроміс між цими показниками.

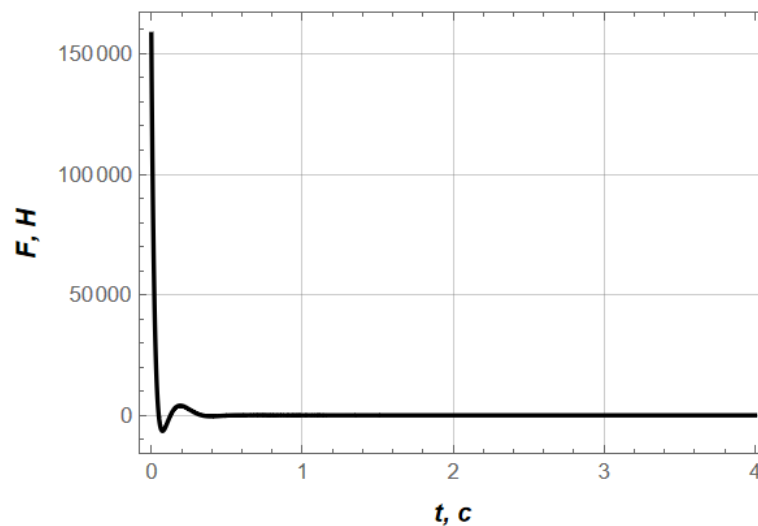


Рисунок 2.2 – Графік зміни рушійного зусилля

З такими ваговими коефіцієнтами рушійне зусилля стартує з дуже великого значення, а саме 158115 Н та за короткий момент опускається до нуля. Такий варіант не є прийнятним.

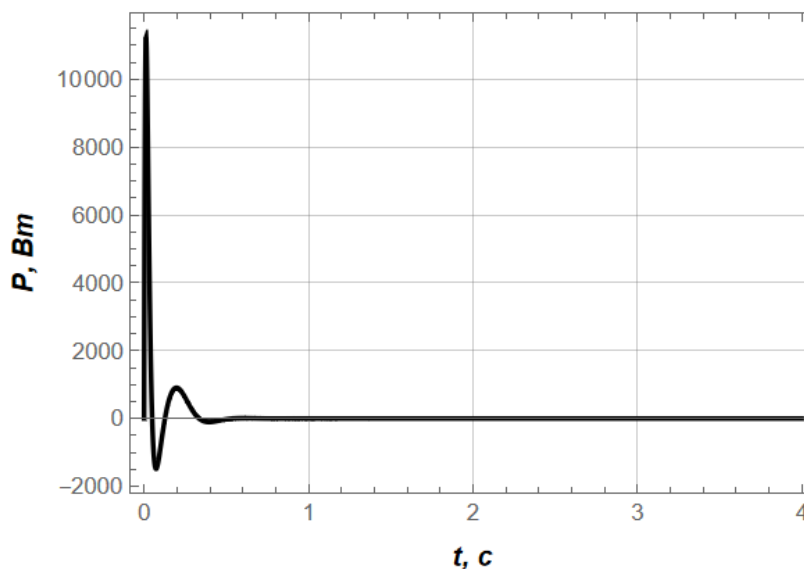


Рисунок 2.3 – Графік зміни потужності

Значення потужності стартує з нуля, але дуже різко підстрибує до 11212 Вт, а потім з перерегулюванням виходить в нуль. Така ситуація створює великі динамічні навантаження на весь механізм, що матиме погані наслідки.

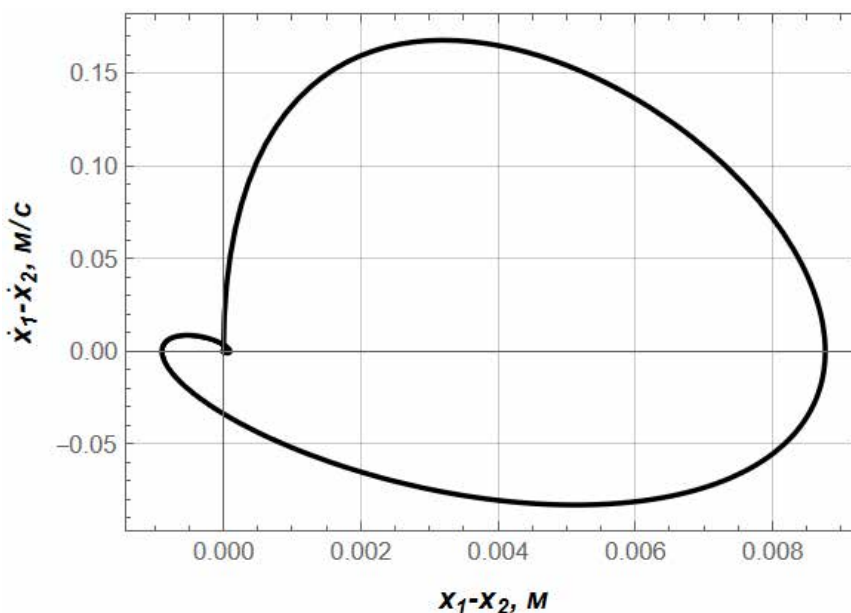


Рисунок 2.4 – Графік пружної деформації канату

Графік переміщення по швидкості виглядає нормально, а початкова точка збігається з останньою як і повинна.

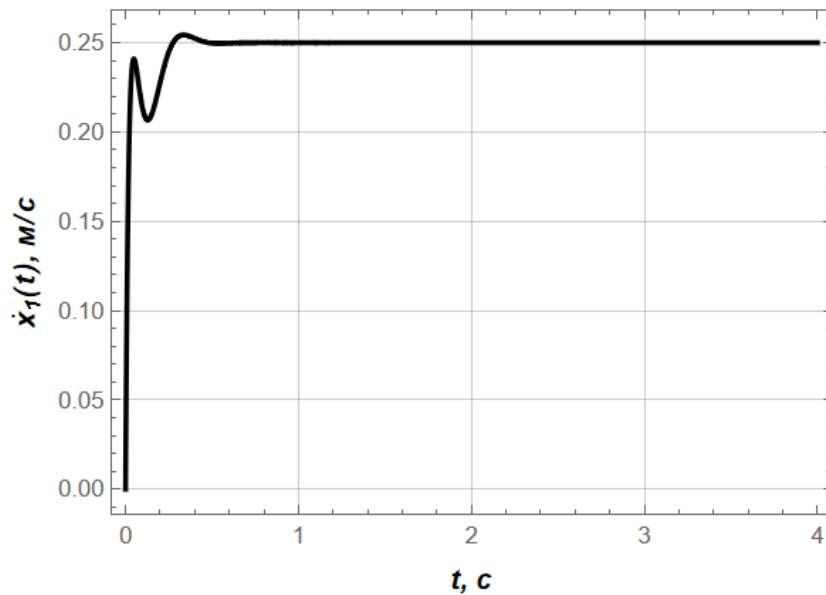


Рисунок 2.5 – Графік зміни швидкості

Графік швидкості демонструє вихід на номінальну швидкість, але з перегулювання, яке потрібно прибрати.

Зменшуючи значення коефіцієнту R максимальні значення на графіках зросли, отже цей показник необхідно збільшувати. Зменшення значення позиційний коефіцієнт δP ніяк не впливає на графіки, а збільшення вище одиниці – збільшує показники, що є непотрібним. В процесі зменшення швидкісного коефіцієнту δV від початкового значення можна помітити, що поставлені задачі починають задовольнятися, але при досягненні деякого значення вже перестають підходити. Отримавши ці данні можна приступити до підбору цих коефіцієнтів в різних задачах.

2.2.2 Приклади розв'язання задачі

Першою задачею для оптимізації є кран з довжиною гнучкого підвісу 2 м та масою вантажу 200 кг. Тут будуть порівнюватись графіки базових значень вагових коефіцієнтів ($\delta R = 5 \cdot 10^{-7}$, $\delta P = 10^{-5}$, $\delta V = 10^5$) та підібраних раціональних ($\delta R = 5 \cdot 10^{-7}$, $\delta P = 10^{-5}$, $\delta V = 3 \cdot 10^3$).

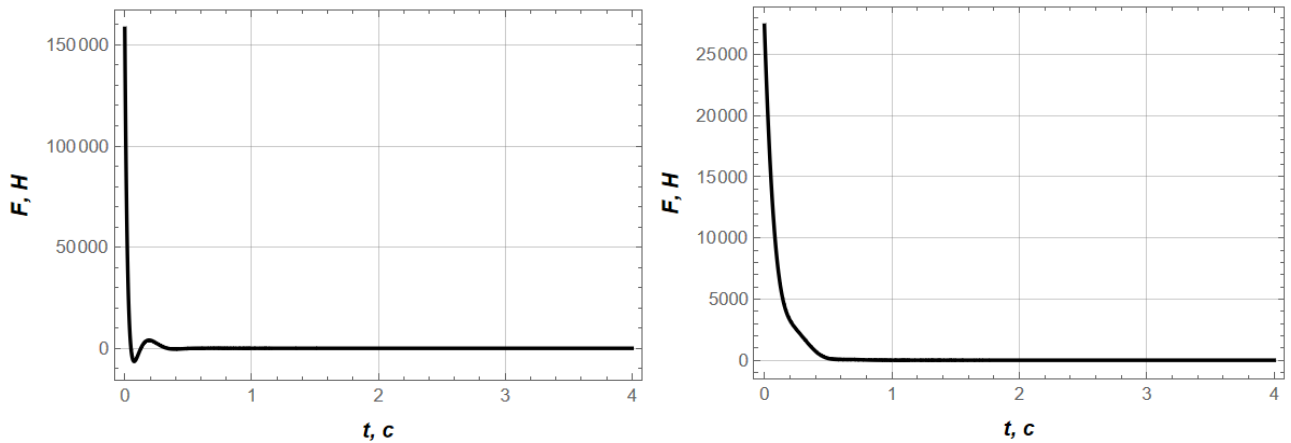


Рисунок 2.6 – Графіки рушійного зусилля I-ї задачі

Перший графік на Рисунку 2.6 має максимальне значення рушійного зусилля на рівні 158115 Н, що є занадто великим. На відміну від цього, графік зі зміненими коефіцієнтами, що дало значення зусилля рівному 27388 Н.

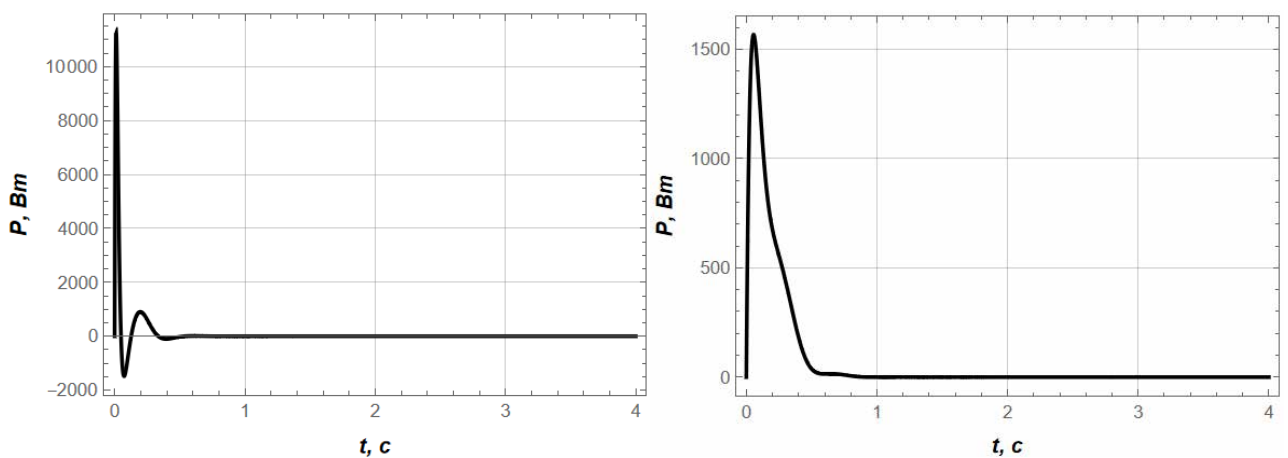


Рисунок 2.7 – Графіки потужності I-ї задачі

В оригінальному вигляді графік демонструє пік зі значенням 11212 Вт, а у зміненому аж 1566 Вт. До того ж, другий графік є більш плавним, що повинно позитивно впливати на роботу двигуна.

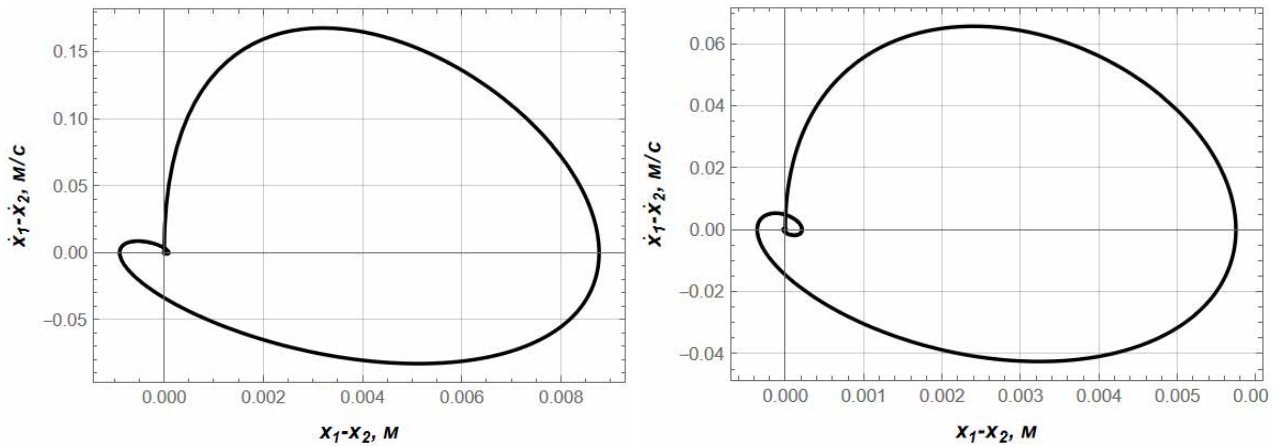


Рисунок 2.8 – Графіки пружної деформації канату I-ї задачі

Через вплив підібрані вагові коефіцієнти пружна деформація зменшилась в порівнянні із базовою моделлю. Через менші тягові зусилля канат не розтягуватиметься як на першому графіку та зможе довше прослужити.

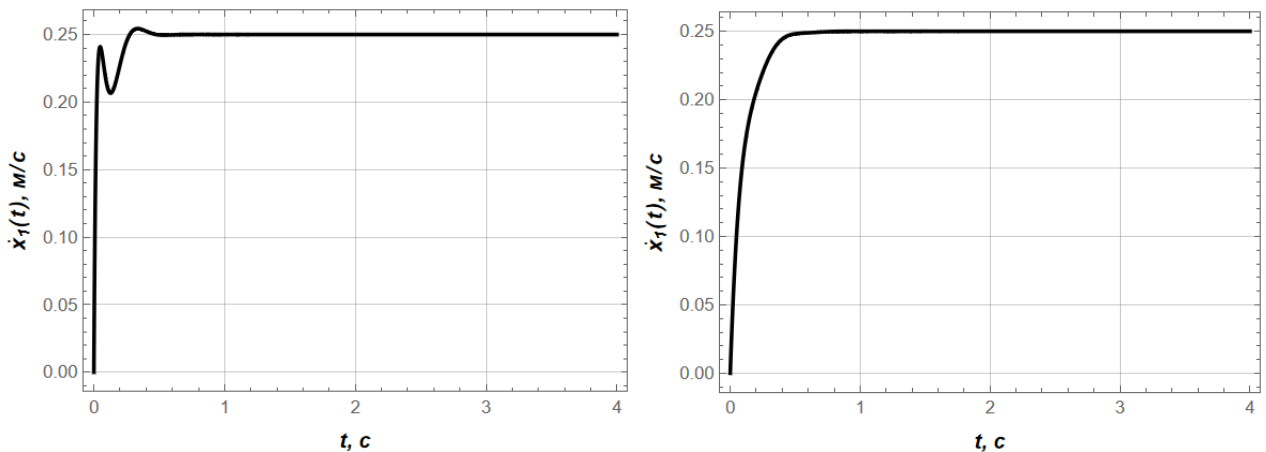


Рисунок 2.9 – Графіки виходу на номінальну швидкість I-ї задачі

На першому графіку можна помітити перехідний процес та перерегулювання, які є небажаними, а на другому – вони відсутні. Виходячи з цього можна сказати, що результат відповідаю бажаним критеріям.

Переходячи до наступної задачі оптимізації крана, довжина гнучкого підвісу збільшиться з 2 до 12 м, а вантаж все ще матиме масу 200кг. Перші графіки кожного показника характеризуватимуть роботу регулятора при базових вагових коефіцієнтах ($\delta R = 5 \cdot 10^{-7}$, $\delta P = 10^{-5}$, $\delta V = 10^5$). Кожен другий

графік створювався за допомогою вже інших значень, що були підібрані вручну, а саме $\delta R = 5 \cdot 10^{-4}$, $\delta P = 1 \cdot 10^{-5}$, $\delta V = 1 \cdot 10^5$.

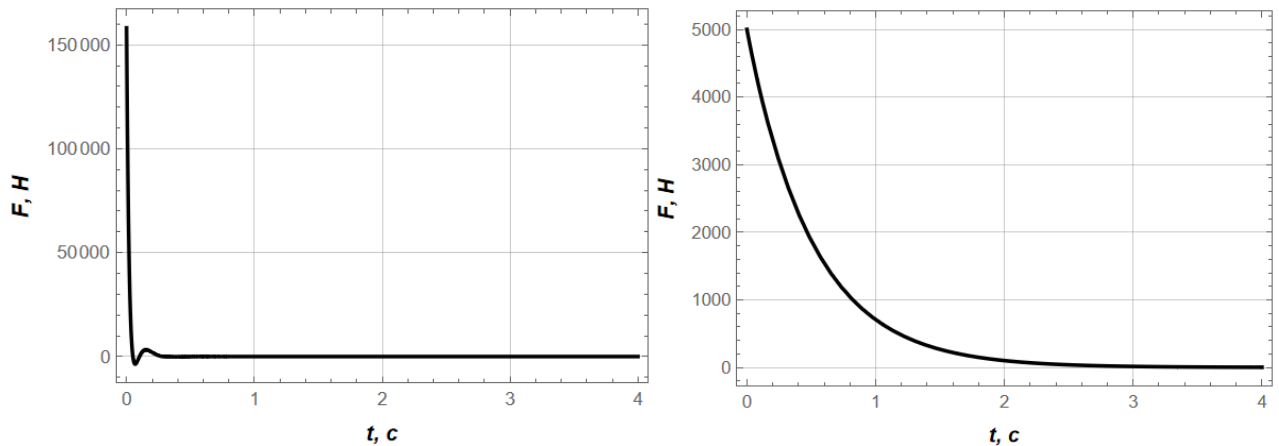


Рисунок 2.10 – Графіки рушійного зусилля II-ї задачі

Для базових значень вагових коефіцієнтів числове значення рушійної сили, як і в попередній задачі, буде на рівні 158115 Н. Проте через зміну довжини гнучкого підвісу оптимальне значення рушійного зусилля становить вже 5000 Н та змінюється плавно, доходячи до нуля.

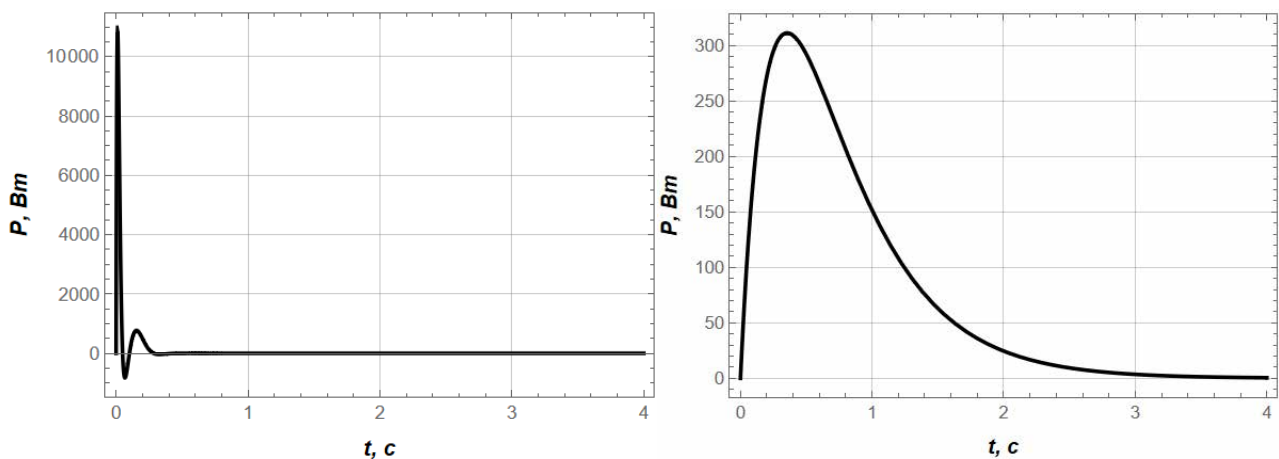


Рисунок 2.11 – Графіки потужності II-ї задачі

Для задачі з такими заданими параметрами базове значення, яке видав регулятор дорівнює 10815 Вт та наростає так швидко як і спадає, що є поганим

результатом. Застосувавши інші коефіцієнти потужність вдалось зменшити до рівня 311 Вт, а також розтягнути цей процес у часі та прибрати різкий перепад.

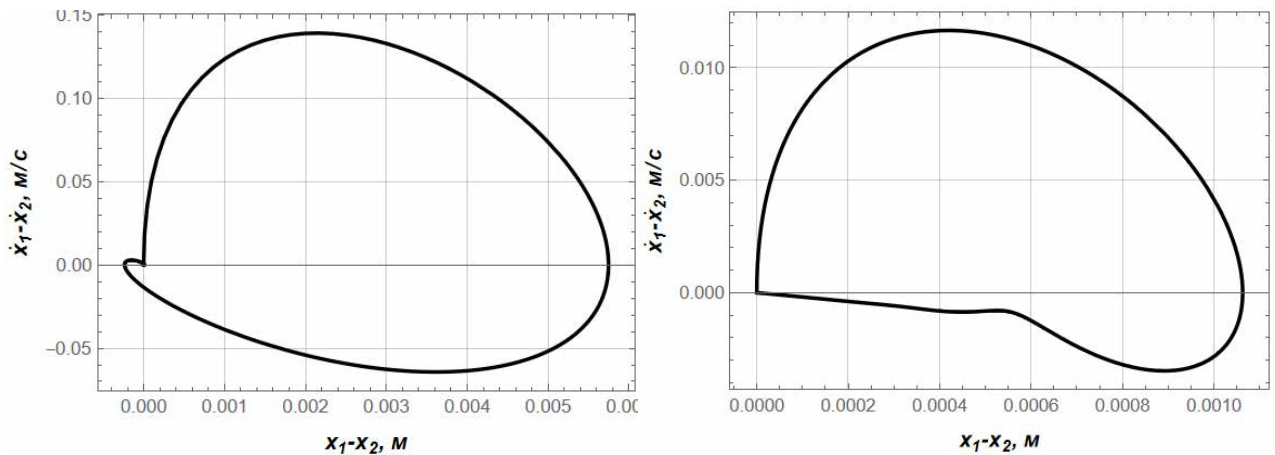


Рисунок 2.12 – Графіки пружної деформації канату II-ї задачі

По даній області можна поміти, що при розтягу канату в базовій версії, відбувається від'ємний розтяг, який ненадовго переходить в ліву половину. Такий процес не відбувається якщо змінити вагові коефіцієнти.

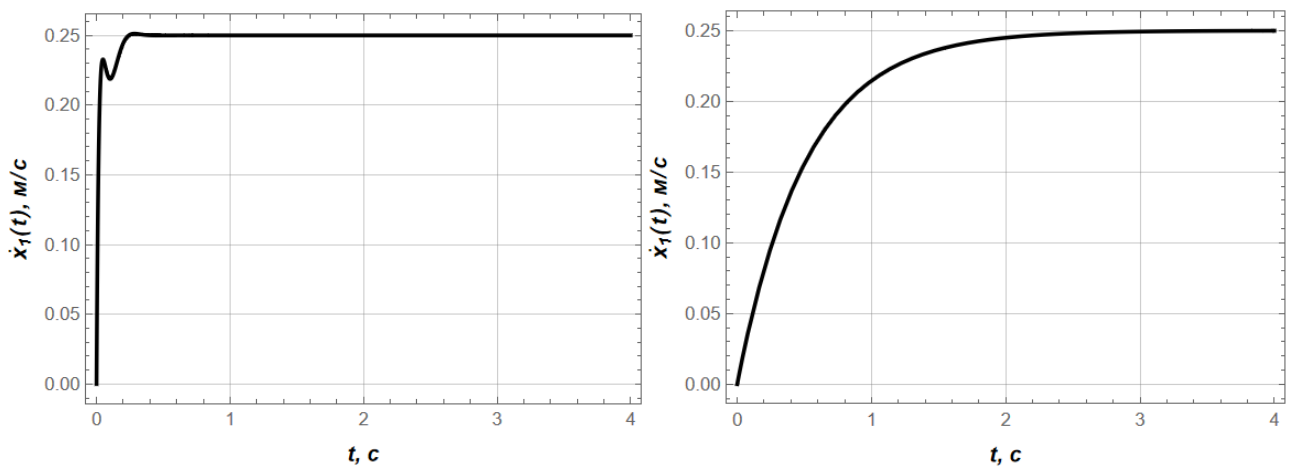


Рисунок 2.13 – Графіки виходу на номінальну швидкість II-ї задачі

Вихід на номінальну швидкість є ледве не найважливішим показником підйомного механізму і те, як виглядає перший графік не задовільняє поставлені завдання. Модифікувавши регулятор, цей процес відбувається плавно та без перерегулювань.

Оптимізація третього крана, що має довжину гнучкого підвісу 12 м та масою вантажу 8000 кг проводиться також в два етапи. Початковий етап матиме незмінні коефіцієнти: $\delta R = 5 \cdot 10^{-7}$, $\delta P = 10^{-5}$, $\delta V = 10^5$. Кінечний етап, що представлений далі на графіках, реалізовує такі значення: $\delta R = 5 \cdot 10^{-4}$, $\delta P = 8 \cdot 10^1$, $\delta V = 4 \cdot 10^4$.

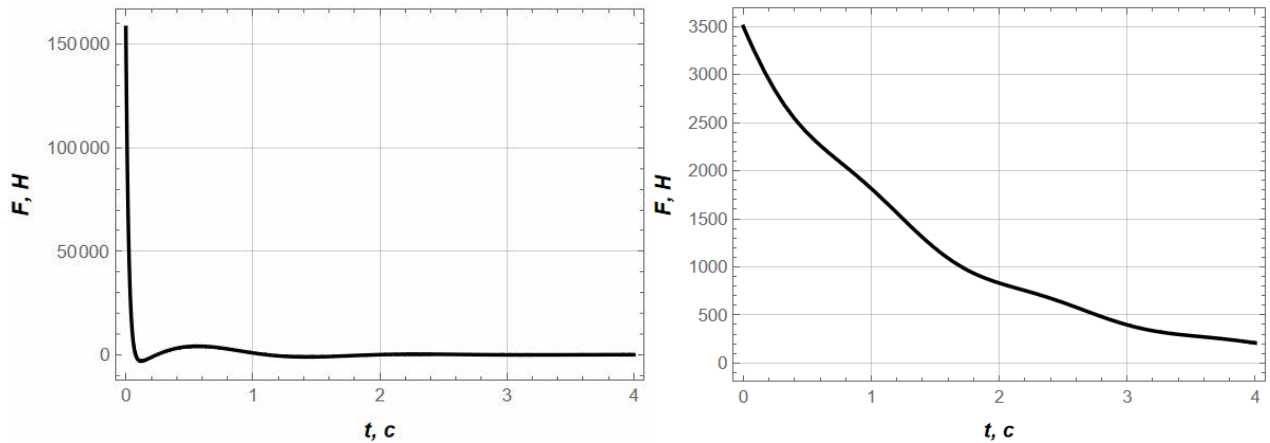


Рисунок 2.14 – Графіки рушійного зусилля III-ї задачі

Як і в попередніх задачах максимальне значення рушійного зусилля досягає значення в 158115 Н. Після внесення змін у вагові коефіцієнти максимум зменшується аж до 3501 Н, опускається в кінці до 208 Н.

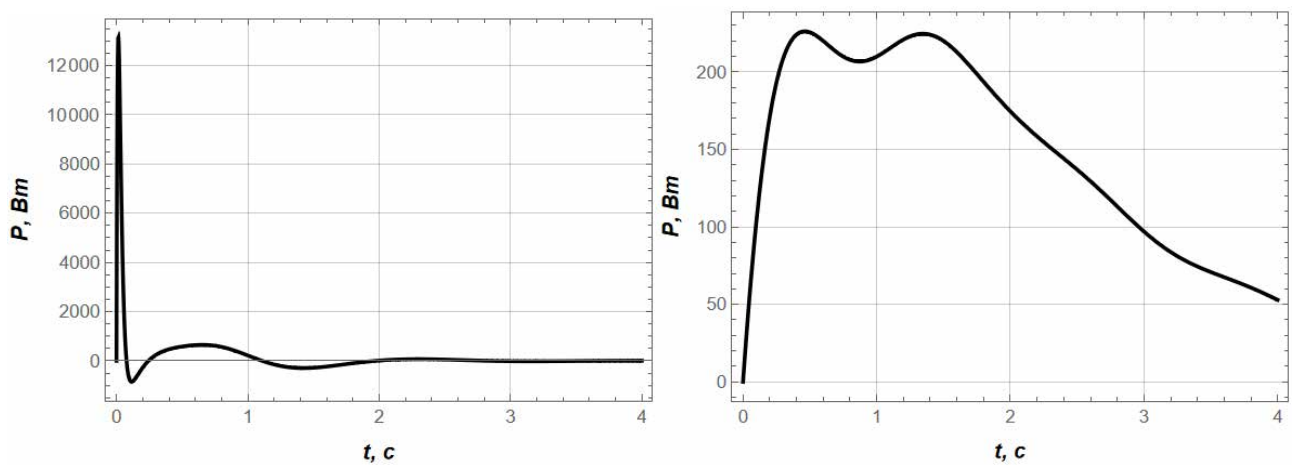


Рисунок 2.15 – Графіки потужності III-ї задачі

Пік вживаної потужності з базовим регулятор досягає 13134 Вт, а зі зміненим тільки до 226 Вт та опускається 52,9 Вт. Цікавим є те, що графік не знижується до кінця після досягнення піку, а досягає ще одного.

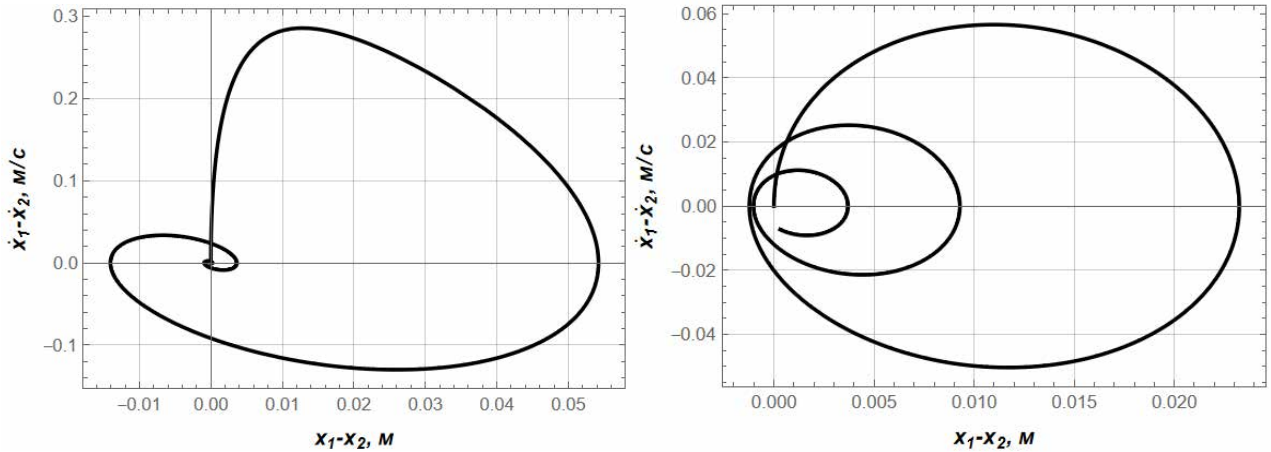


Рисунок 2.16 – Графіки пружної деформації канату III-ї задачі

Область, що описує деформацію канату при стандартному регуляторі має схожий характер при порівнянні з попередніми задачами, але з більш вираженими формами. Змінивши вагові коефіцієнти LQR-регулятора деформація стала схожа на спіраль, що схоже на затухаючі коливання як в маятнику.

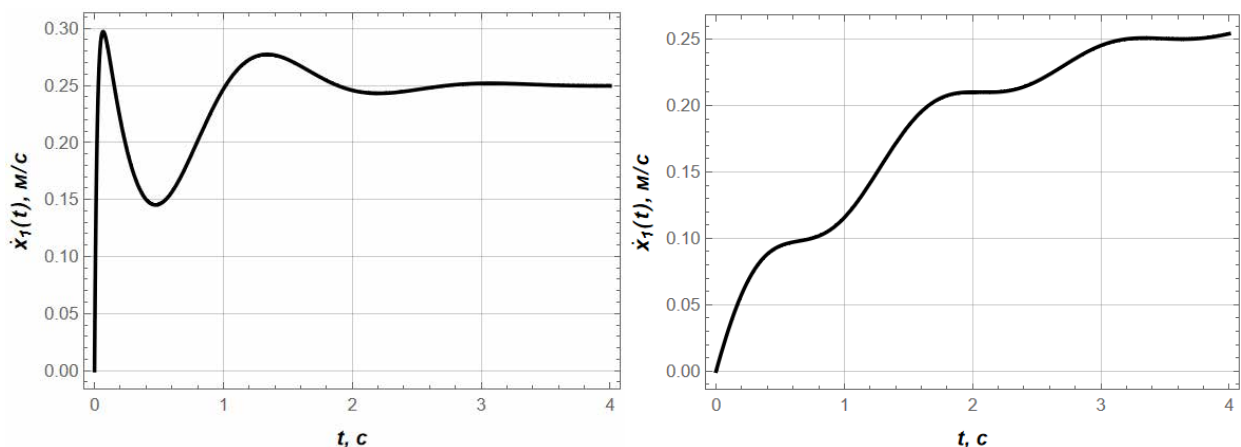


Рисунок 2.17 – Графіки виходу на номінальну швидкість III-ї задачі

Регулятор з базовими коефіцієнтами при виході на номінальну швидкість дійшов до значення 0,297 м/с та містить ділянку з перерегулюванням. Після підбору кращих коефіцієнтів був отриманий такий графік, що описує не плавний, але послідовний вихід системи на необхідну швидкість, що задовільняє поставлені задачі.

Останньою оптимізується кран із довжиною гнучкого підвісу 2 м та масою вантажу 8000 кг. Початкові значення коефіцієнтів незмінні, а саме: $\delta R = 5 \cdot 10^{-7}$, $\delta P = 10^{-5}$, $\delta V = 10^5$. Для отримання кінечних графіків застосуємо такі значення: $\delta R = 5 \cdot 10^{-2}$, $\delta P = 10^4$, $\delta V = 10^6$.

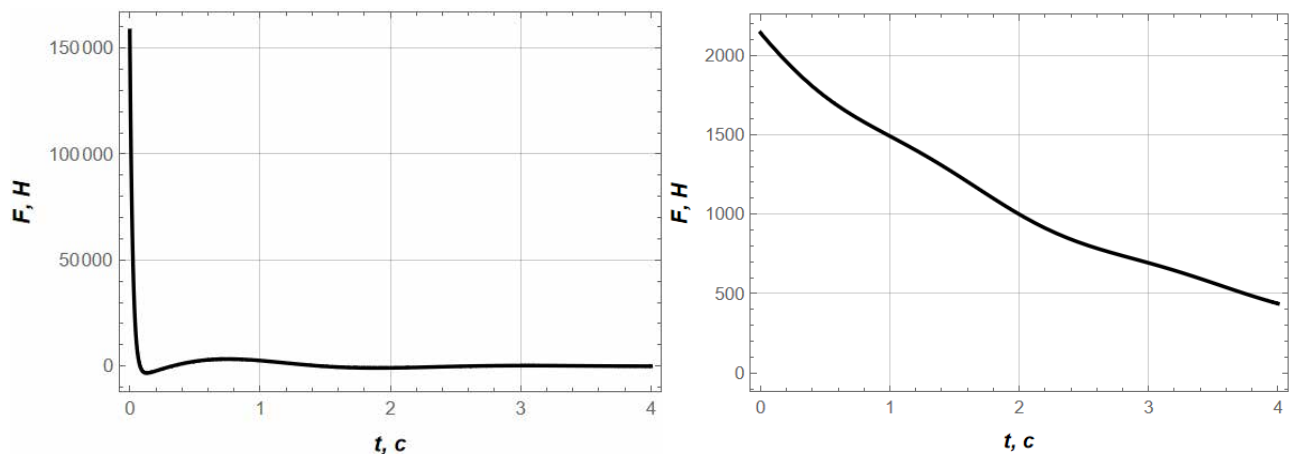


Рисунок 2.18 – Графіки рушійного зусилля IV-ї задачі

Вже звичний максимум для графіків рушійного зусилля в 158115 Н, що зумовлений ідентичними коефіцієнтами. Оптимальний же графік стартував зі значення 2139 Н та опустився до 449 Н.

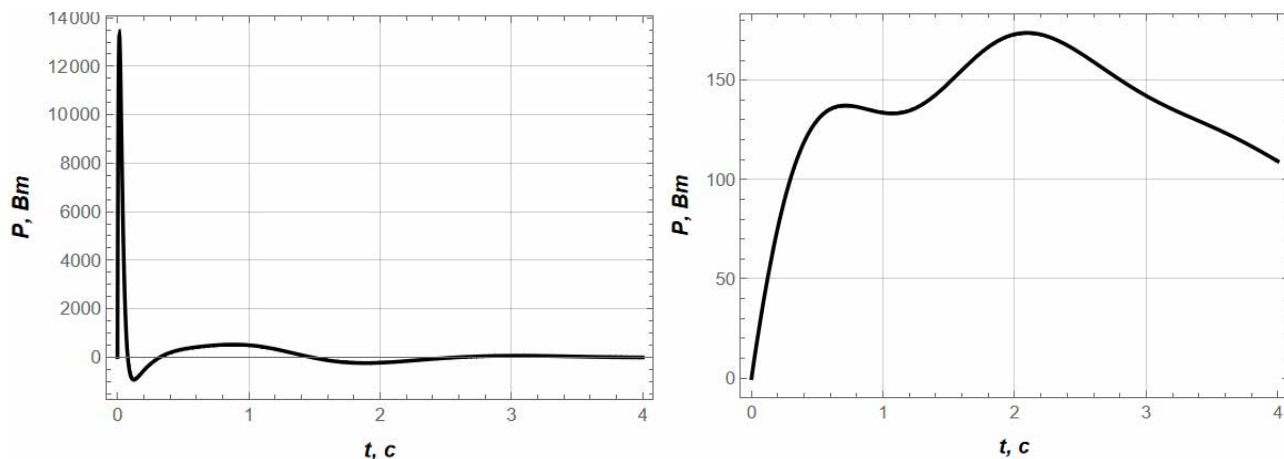


Рисунок 2.19 – Графіки зміни потужності IV-ї задачі

Зміна потужності на першому графіку досягає максимуму 13221 Вт. Графік зміненого регулятора досягає піку в 177 Вт, досягаючи в кінці тільки 108 Вт.

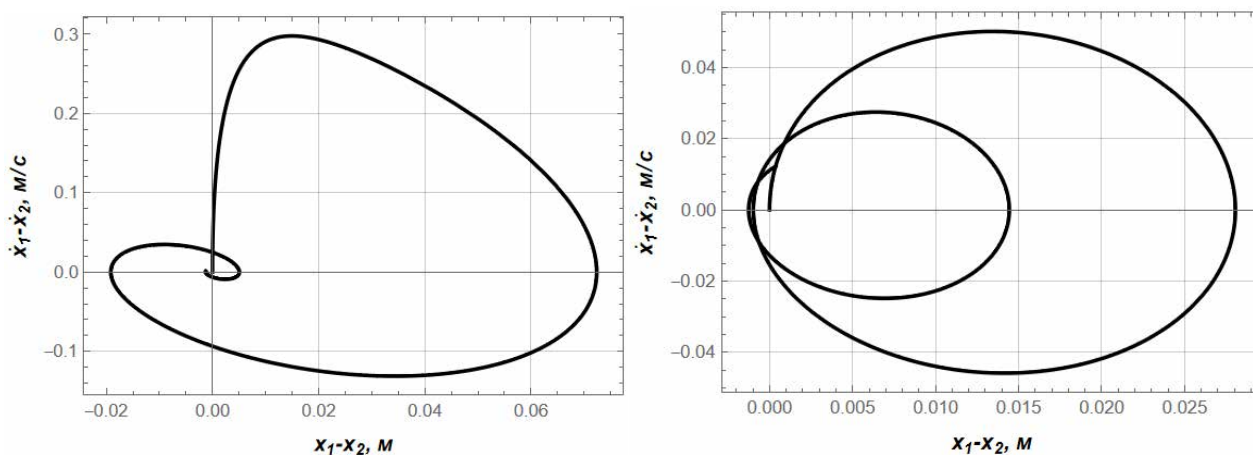


Рисунок 2.20 – Графіки пружної деформації канату IV-ї задачі

Деформація канату, що не дивно, в першому випадку має схожий із попередніми задачами характер будови графіка. Модифікований регулятор видав графік, що описує затухаючі коливання в канаті, що направлені на розтяг.

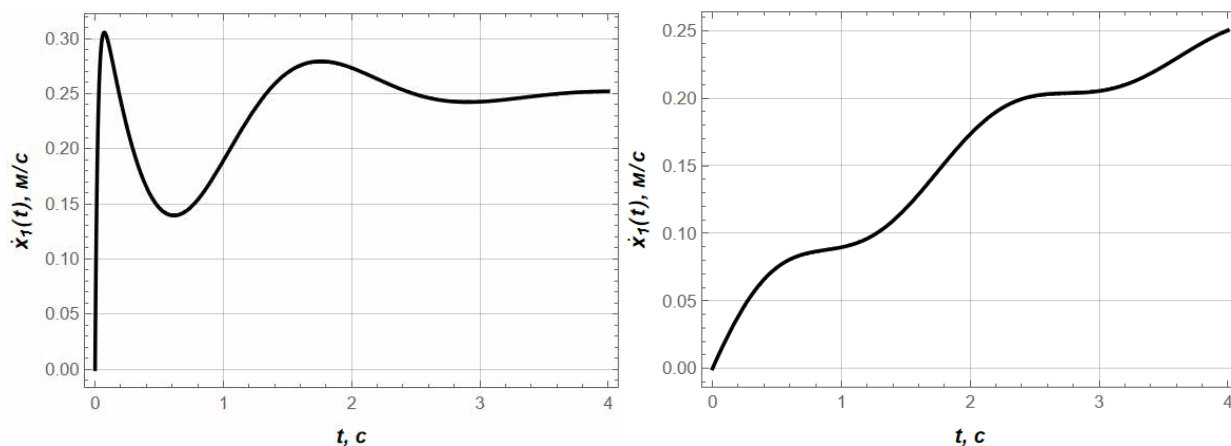


Рисунок 2.21 – Графіки виходу на номінальну швидкість IV-ї задачі

За схожим із попередньою задачею принципом, для виходу на номінальну швидкість графік дійшов до піку 0,305 м/с. Оптимальний регулятор вийшов на номінальний показник швидкості плавніше та з мінімальним перерегулюванням.

2.3 Аналіз отриманих результатів

Розробивши оптимальні регулятори для всіх чотирьох задач тепер можна занести в таблиці значення самих вагових коефіцієнтів, а також середньоквадратичні та максимальні значення показників, що зображались на графіках. Ці значення дадуть нам загальну картину впливу тих чи інших значень на результат.

Таблиця 2.1

Таблиця вагових коефіцієнтів LQR-регулятора

Номер задачі	Коефіцієнти			
	Q_1	Q_2	V_1	V_2
I-базова	$2,83 \cdot 10^6$	$2,83 \cdot 10^6$	529047	103409
II-базова	$3,18 \cdot 10^6$	$-3,19 \cdot 10^6$	545266	87189,3
III-базова	$1 \cdot 10^6$	$-1 \cdot 10^6$	466608	165849

IV-базова	813211	-813204	463682	168775
-----------	--------	---------	--------	--------

Продовження таблиці 2.1

I- оптимальна	379678	-379672	111741	-2195,5
II- оптимальна	17748,5	-17748,3	19957,1	43,03
III- оптимальна	2089,33	-1523,65	9272,97	4163,94
IV-оптимальна	829,06	-196,6	5227,6	2701,58

Після занесення вагових коефіцієнтів до таблиці можна провести аналіз їх впливу на кожен механізм підйому вантажу. Через зміну інших параметрів кожної системи ці задачі будуть розглядатись окремо.

В задачі, де довжина гнучкого підвісу маленька, а вантаж досить невеликий, збільшення значення коефіцієнта δR , що потім взаємодіє з іншими коефіцієнтами, зменшує максимальні значення на графіках, що позитивно впливає на процес оптимізації. Зростання маси вантажу до 8 т створює перерегулювання на графіках через більшу інерцію в процесі руху, але таку задачу все ще можна вирішити за допомогою одного коефіцієнта. При зміні довжини гнучкого підвісу до 12 м, вплив значення δR буде таким ж істотним.

Якщо змінити масу вантажу до 8000 кг з довжиною підвісу 12 м, система стає ще менш стабільною, а через це графіки вже не такі «гарні». В такому випадку з'являються перерегулювання, що необхідно прибирати за допомогою інших коефіцієнтів.

На відміну від першого коефіцієнту, позиційна складова регулятора δP при збільшенні значення вище одиниці підвищує піки на графіках, що може бути корисним при оптимізації, коли графік виглядає задовільно, але не виходить на прийнятні значення, наприклад на номінальну швидкість.

Третій та останній ваговий коефіцієнт δV при відхиленні в сторону зменшення від базового значення має схожий вплив як і перший коефіцієнт, що

виражено в розгладжуванні нерівностей на графіку та зменшень максимальних значень.

Таблиця 2.2

Таблиця класів середньоквадратичних та максимальних показників

Номер задачі	Показники					
	$F_{сер}$	$P_{сер}$	$x_1-x_2_{сер}$	F_{max}	P_{max}	$x_1-x_2_{max}$
I-базова	7399,04	808,871	0,0013	158116	11083,9	0,0087
II-базова	7242,48	754,246	0,0008	158116	10753,3	0,0057
III-базова	8179,82	1086,47	0,0179	158116	13130,6	0,0542
IV-базова	8209,73	1105,61	0,0276	158116	13268,5	0,0724
I- оптимальна	2883,19	286,755	0,0006	27387,9	1599,92	0,0034
II-оптимальна	1260,12	128,578	0,0003	5000,08	311,205	0,0011
III-оптимальна	1457,61	163,528	0,0091	3500,65	226,203	0,0232
IV-оптимальна	1198,98	139,858	0,0131	2140,41	173,833	0,0281

Дана таблиця показує максимальні та середньоквадратичні значення кожного з параметрів механізму підйому, таких як рушійна сила, вживана потужність та пружна деформація канату. Для кожної задачі застосовувались різні значення довжини гнучкого підвісу та маси вантажу, а також вагові коефіцієнти регулятора. В базових LQR-регуляторах коефіцієнти незмінні, а для оптимальних – підбирались ситуативно, тому мають відмінності.

При порівнянні значень кожної задачі окремо, стає очевидно, що оптимальні регулятори мають менші показники, а тому краще справляються з розв'язанням поставлених завдань. Можна помітити, що для різних базових розв'язань задач із різними параметрами значення схожі, що спричинене використанням однакових регуляторів.

Підсумком проведеної роботи є оптимальний LQR-регулятор, що може працювати в різних умовах та з різним навантаженням та добре справляється із поставленими завданнями.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА СХЕМИ СИСТЕМИ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ МЕХАНІЗМОМ ПІДЙОМУ ВАНТАЖУ

3.1 Розробка структурної схеми системи керування

Розробляючи систему оптимального керування механізмом підйому вантажу баштового крана з вертикальною стрілою потрібно врахувати вимоги та специфікації, які забезпечують ефективну роботу підйомного механізму. Метод застосування LQR вибраний для реалізації контролю через його можливість оптимальної мінімізації заданого функціоналу.

Через важливість роботи кранів у міських умовах, що часто супроводжуються необхідністю піднімати різні за масою вантажі, механізм повинен розміщувати їх з високою точністю для уникнення появ пошкоджень.

Шляхом запровадження оптимального керування швидкістю підйому система зможе використовувати мінімальну кількість енергії та часу, а плавне регулювання швидкості та оптимізоване гальмування повинні зменшити показники зношення механізмів. Також завдяки запровадженню такого регулятора система зможе адаптуватися до різних вагових характеристик вантажу маючи змогу автоматично коригувати параметри підйому для підтримки стабільності.

Покращення механізму підйому баштового крана не може обійтись без врахування впливів зовнішніх умов, що можуть спричинити коливання або інші перешкоди. Протидія цьому відбуватиметься автоматично коригуючи зусилля у разі поривів вітру. Для реалізації методу LQR модель повинна враховувати лінійність системи.

Система має обладнуватись сенсорами для вимірювання висоти підйому, швидкості підйому, коливань та ін. Об'єднані дані з них постійно передаються до контролера, що забезпечує зворотний зв'язок і можливість миттєвих коригувань.

Окремі вимоги формуються і до самого LQR алгоритму. Для такого регулятора потрібно визначити матриці ваг, що визначають вагомість відхилень та витрат під час керування. Завдяки застосуванню великої кількості датчиків, регулятор отримуватиме необхідний зворотній зв'язок.

Щоб отримати можливість впровадити LQR необхідно встановлювати ПЛК, що зможе проводити обчислення в реальному часі та з високою швидкістю реакції на зміни в середовищі.

Отже, вимоги до розробки структурної схеми системи оптимального керування механізмом підйому вантажу баштового крана націлені на створення в першу чергу ефективної системи, яка б відповідала стандартам безпеки та забезпечувала точність підйомних операцій. Це включає адаптивну систему керування з широким використанням сенсорів, що надають зворотній зв'язок та оптимізаційних алгоритмів для досягнення максимальних робочих показників крана.

Описана вище система має містити датчики, контролер, частотний перетворювач та привідні механізми.

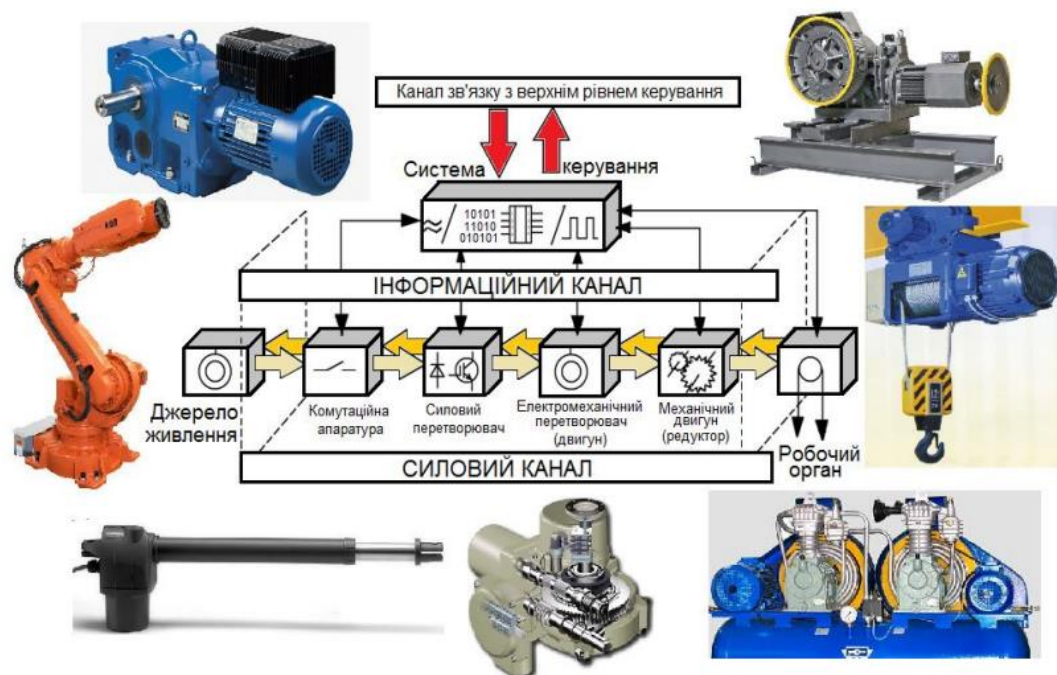


Рисунок 3.1 – Загальна структурна схема керування

Структурна схема системи вказує на взаємозв'язок усіх компонентів, таких як датчики, контролери, виконавчі механізми, вхідні інтерфейси та канали зворотного зв'язку, що дозволяють контролеру отримувати інформацію про поточний стан вантажу;

На основі результатів моделювання оцінюється робота системи та виявляються можливі недоліки або обмеження. Це допомагає визначити, чи відповідає система оптимального керування поставленим вимогам щодо стабільності, енергоефективності та точності, і в разі необхідності внести зміни до структурної схеми або параметрів керування.

Виходячи з представленого визе, розробка структурної схеми системи оптимального керування механізмом підйому вантажу являється процесом, що включає аналіз, моделювання, вибір обладнання, розробку алгоритмів та їх тестування для забезпечення ефективної та безпечної експлуатації крана.

3.2 Розробка рекомендацій стосовно апаратної частини системи (датчики, керовані приводи, мікроконтролери)

Розібравшись із вимогами до системи можна приступити до вибору елементів системи.

Для формування рекомендацій апаратної частини системи, що зможе в повній мірі виконувати необхідні завдання, потрібно переглянути та проаналізувати існуючі рішення та їх різні компоненти.



Рисунок 3.2 – Електрична шафа баштового крана фірми Liebherr

На вторинному ринку можна знайти не старі, але вже досить застарілі баштові крани, що можуть підлягати модернізації. На рисунку 3.2 представлено апаратну частину крана Liebherr, що може бути замінена на новішу, в разі потреби. Використання не нових кранів дозволяє зекономити великі кошти, які можна вкласти в їх покращення та ремонт.

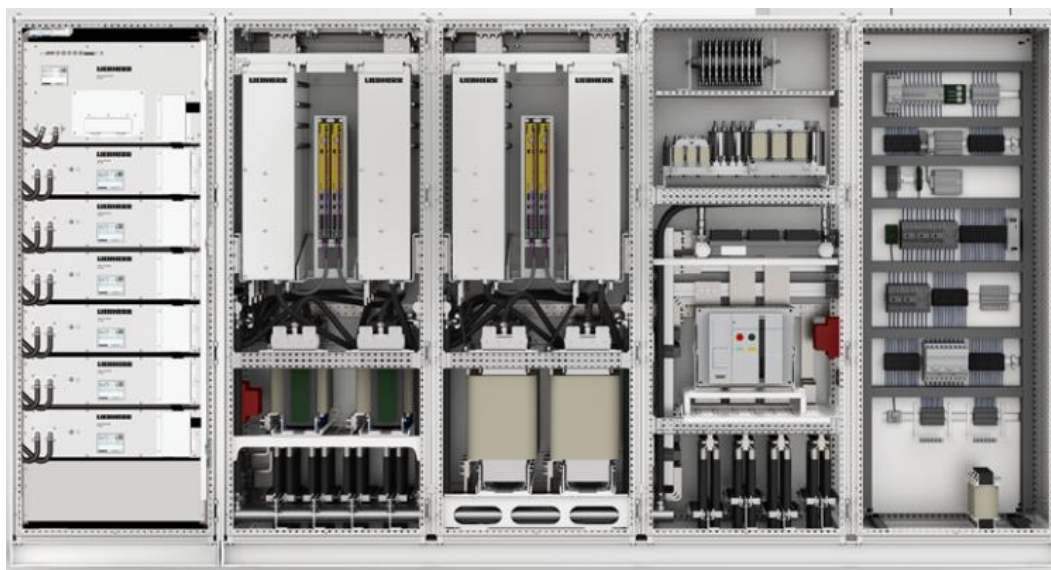


Рисунок 3.3 – Електрична шафа нового крана Liebherr

Тут вже можна побачити дорожчий та новіший варіант, проте він вже має необхідні компоненти для оптимального руху механізму підйому вантажу, такі як частотний перетворювач, ПЛК і т. д.

Загалом для модернізації існуючого ненового крана необхідно використовувати різні компоненти, такі як датчики повороту (енкодери), датчики розтягу (тензometri), програмовані логічні контролери (ПЛК), частотні перетворювачі [4, 5] та інше.

Ось рекомендовані енкодери, тензometri, частотні перетворювачі та ПЛК, які широко використовуються в сучасних роботизованих кранах, з їх короткими характеристиками:

Енкодери

1. Heidenhain ROD 420



Рисунок 3.4 – Енкодери фірми Heidenhain

Оптичний поворотний енкодер, відомий своєю високою точністю та роздільною здатністю. Використовується для контролю позиціонування підйомних механізмів у кранах.

2. SICK DFS60



Рисунок 3.5 – Енкодер SICK DFS60

Інкрементальний енкодер з роздільною здатністю до 16 384 імпульсів на оберт, стійкий до ударів і вібрацій, що ідеально підходить для важких умов на будівництві.

3. Baumer HS35F



Рисунок 3.6 – Енкодер Baumer HS35F

Абсолютний енкодер з магнітним принципом дії, який забезпечує стабільність роботи у складних умовах експлуатації, як-от при високій вологості або температурі.

4. Posital Fraba IXARC



Рисунок 3.7 – Енкодери фірми IXARC

Енкодери з високою надійністю і стійкістю до зовнішніх впливів, здатні працювати в екстремальних умовах. Підходять для важких умов експлуатації.

Тензометри (тензодатчики)

1. VPG KIS-8



Рисунок 3.8 – Тензомер VPG KIS-8

Високоточний тензомер для контролю натягу тросів і ваги вантажу, має високу точність і витримує серйозні навантаження.

2. HBM Z6



Рисунок 3.9 – Тензодатчик HBM Z6

Надійний тензометр для застосування на будівництві, що має високу стійкість до вібрацій і захищений від корозії, забезпечує точне вимірювання навантаження.

3. Sensy 5100-5105



Рисунок 3.10 – Тензометри Sensy 5100

Спеціалізований датчик для підйомних механізмів, що забезпечує високу точність вимірювання під час руху і змінних навантажень.

4. Flintec RC3



Рисунок 3.11 – Тензометр Flintec RC3

Популярний тензометр, що витримує високі навантаження і відомий своєю довговічністю. Часто використовується в промислових підйомних системах.

Частотні перетворювачі

1. Siemens SINAMICS G120



Рисунок 3.12 – Частотний перетворювач Siemens SINAMICS G120

Надійний частотний перетворювач для важких умов експлуатації, має функцію плавного регулювання швидкості і захисту від перевантаження.

2. Yaskawa A1000



Рисунок 3.13 – Частотний перетворювач Yaskawa A1000

Перетворювач, відомий функціями анти-коливального контролю, що підходить для точного управління рухом вантажу.

3. ABB ACS880



Рисунок 3.14 – Частотний перетворювач ABB ACS880

Потужний частотний перетворювач з можливістю зворотного зв'язку через енкодери, що забезпечує точне керування в режимі реального часу.

4. Danfoss VLT AutomationDrive FC 302



Рисунок 3.15 – Частотні перетворювачі Danfoss VLT AutomationDrive FC 302

Відповідає високим стандартам безпеки, має функції енергозбереження та підтримує плавний пуск і зупинку механізму.

Програмовані логічні контролери (ПЛК)

1. Siemens SIMATIC S7-1200

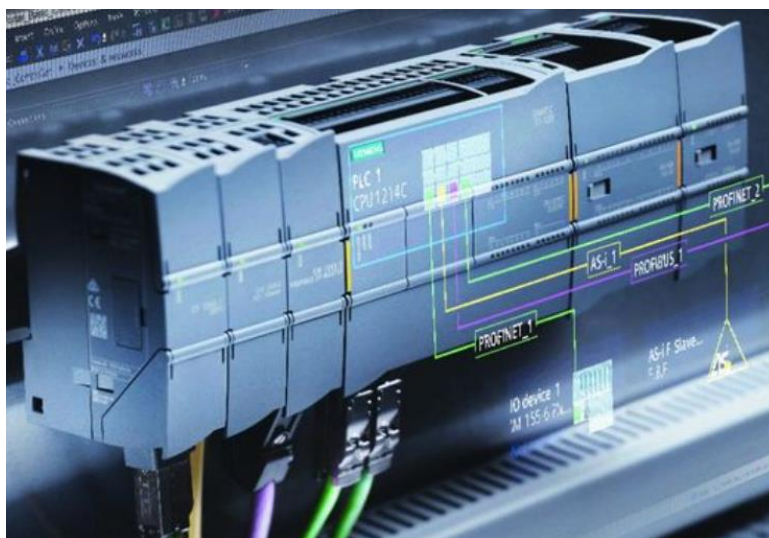


Рисунок 3.16 – Програмований логічний контролер Siemens SIMATIC S7-1200

Багатофункціональний ПЛК для систем автоматизації, підтримує інтеграцію з різними датчиками і приводами, що забезпечує високу точність роботи.

2. Allen-Bradley CompactLogix



Рисунок 3.17 – Програмований логічний контролер Allen-Bradley CompactLogix
Потужний контролер з можливістю програмування складних алгоритмів
і управління рухом, оптимальний для роботизованих систем.

3. Omron CJ2M



Рисунок 3.18 – Програмований логічний контролер Omron CJ2M

Компактний ПЛК з широкими можливостями інтеграції, підходить для
роботи з підйомними системами в умовах постійних навантажень.

4. Schneider Electric Modicon M340



Рисунок 3.19 – Програмований логічний контролер Schneider Electric Modicon
M340

ПЛК, що забезпечує стабільну роботу в промислових умовах, підтримує функції збору та обробки даних і легко підключається до мережі.

Ці пристрої дають можливість забезпечити високу продуктивність, надійність і точність в управлінні роботизованими кранами, що є ключовими для безпечного і ефективного будівництва.

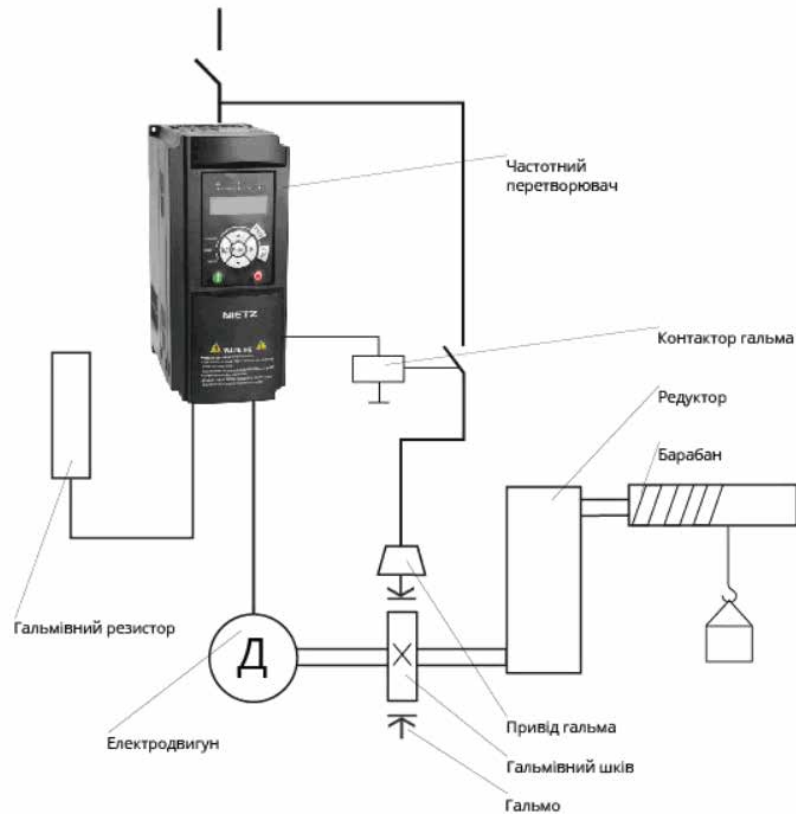


Рисунок 3.20 – Кінематична схема підйомного механізму з частотним перетворювачем

Вище представлена кінематична схема із застосуванням частотного перетворювача. Для правильної роботи механізму також встановлюється гальмівний резистор, що зможе рекуперувати надлишкову потужність, створену двигуном. Не слід забувати і про контактор гальма з приводом, що дасть можливість керувати гальмами.

3.3 Розробка алгоритмічної частини роботи системи

Для реалізації роботи оптимального керування механізмом підйому вантажу необхідно скласти алгоритмічну схему процесу підйому всього привода. Ця схема включає розроблену систему керування з використанням LQR-регулятора.

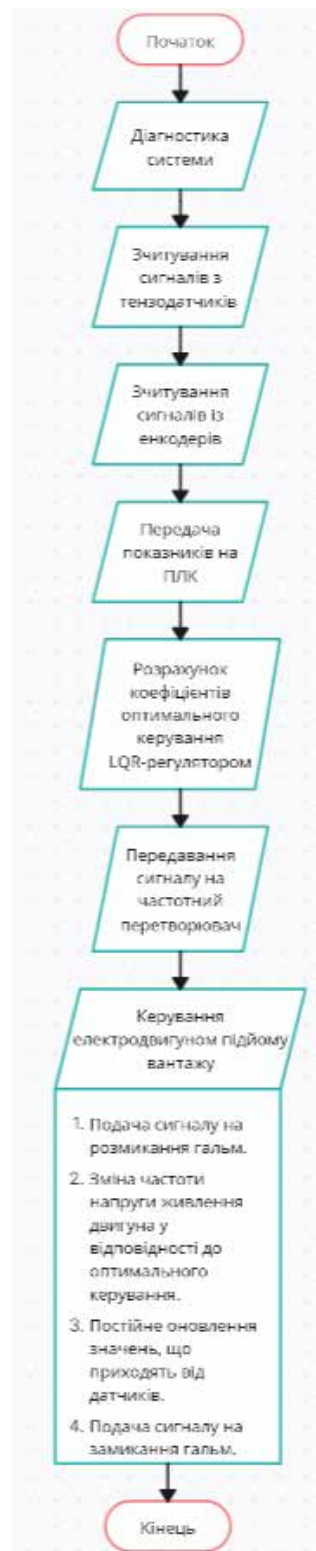


Рисунок 3.20 – Алгоритмічна схема керування механізмом підйому вантажу під час роботи

Така схема має містити датчики, що будуть вимірювати вагу вантажу, довжину гнучкого підвісу, тобто на скільки витягнути з барабану канат, а також

програмований логічний контролер, що проводитиме розрахунки вагових коефіцієнтів регулятора в реальному часі. Сигнали з ПЛК передаються на частотний перетворювач, що реалізує принцип на практиці, вмикаючи електродвигун та застосовуючи гальма.

Приклади комплектуючих, що можуть застосовуватись в сучасних кранах вже були продемонстровані вище в пункті 3.2, що дає широкий вибір в залежності від конкретних потреб.

На даній схемі на рисунку 3.20, зображений конкретний порядок роботи комплектуючих. Початок роботи запускає програмну діагностику цифрових систем, далі відбувається перевірка роботи тензометричних датчиків, що визначають масу підвішеного вантажу. Після цього проводиться зчитування даних із датчиків повороту (енкодерів), завдяки яким отримується інформація про кількість обертів канатного барабану в ту чи іншу сторону, що в свою чергу дає можливість визначити довжину гнучкого підвісу. Всі ці данні записуються на програмований логічний контролер, що може їх застосувати для визначення оптимальних вагових коефіцієнтів LQR-регулятором. Згодом ця інформація передається на частотний перетворювач в доступній для нього формі, а вже він задає рівень живлення електродвигуном та замикає/розмикає гальма.

РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ПРОЕКТУ

4.1 Фактори, які впливають на підвищення ефективності виконання технологічних операцій

Фактори, які впливають на підвищення ефективності виконання технологічних операцій при роботі з механізмом підйому баштового крана

Підвищення ефективності роботи баштового крана залежить від багатьох факторів, пов'язаних з технічними, організаційними та людськими аспектами. Забезпечення ефективної роботи крана зводиться не тільки до швидкості та точності, але й до безпеки та енергоефективності. Нижче наведені ключові фактори, що сприяють підвищенню продуктивності та зниженню витрат при виконанні технологічних операцій.

1. Технічний фактори.
2. Організаційний фактор.
3. Погодній фактор.
4. Людський фактор.
5. Економічні фактори.
6. Програмні фактори.

Використання інноваційних систем керування (як-от автоматизація, алгоритми анти-коливання) дозволяє значно підвищити точність підйому і переміщення вантажу. Встановлення систем, що контролюють коливання вантажу, дозволяє знизити час виконання операцій, підвищуючи стабільність і безпеку при переміщенні вантажів.

Перетворювачі частоти забезпечують плавне регулювання швидкості підйому, що не тільки запобігає коливанням вантажу, але й підвищує енергоефективність.

Датчики, які відслідковують нахил стріли, швидкість, положення вантажу, дозволяють знизити ризик помилок і забезпечують зворотний зв'язок для автоматичної системи керування.

Чітке планування розташування вантажів і маршруту підйому значно економить час. Це дозволяє уникнути зайвих переміщень і забезпечує злагодженість у виконанні операцій. Правильне маркування і розмежування зон роботи крана забезпечує безпечне виконання завдань, уникаючи простоїв через необхідність евакуації персоналу з робочої зони.

За складних операцій важливо розподілити завдання між операторами (наприклад, один контролює підйом вантажу, інший слідкує за зоною переміщення). Це дозволяє уникнути перевантаження одного працівника і підвищує швидкість виконання завдань.

Робота в умовах сильного вітру, дощу або снігу значно знижує ефективність і підвищує ризик небезпеки. Знання прогнозу погоди дозволяє краще планувати операції, уникати простоїв та забезпечувати безпечне переміщення вантажу.

Підтримка оптимальної температури роботи механізмів допомагає зменшити їх знос та підвищити ефективність. У холодних умовах важливо використовувати підігрівачі для тросів і мастил, а в умовах спеки – охолоджувальні системи.

Кваліфікований оператор крана знає тонкощі управління та може швидко реагувати на нештатні ситуації. Це знижує ризик помилок і пришвидшує виконання операцій.

Регулярні інструктажі та оновлення знань допомагають операторам працювати з максимальним рівнем безпеки, що впливає на продуктивність та злагодженість роботи. Втома або стрес оператора можуть вплинути на швидкість і точність роботи. Забезпечення комфортних умов праці, перерв та робочого графіку підвищує продуктивність та знижує ймовірність помилок.

Використання енергоефективних двигунів та частотних перетворювачів допомагає знизити витрати на електроенергію і водночас покращити стабільність управління. Регулярне технічне обслуговування та своєчасний ремонт запобігають непередбачуваним зупинкам і простоям, що забезпечує стабільну і безперебійну роботу.

Інвестиції в оновлення або модернізацію застарілого обладнання, що підвищує ефективність, окупаються зменшенням простоїв і покращенням якості роботи. Впровадження систем автоматизації з можливістю віддаленого моніторингу та керування, наприклад, на базі ПЛК (програмованих логічних контролерів), забезпечує точне управління і значно полегшує контроль за виконанням операцій.

Використання програмного забезпечення для автоматичного планування оптимальної траєкторії підйому вантажу (наприклад, алгоритмів мінімізації коливань) допомагає скоротити час на налаштування операцій і забезпечити плавний рух.

Усі ці фактори комплексно сприяють підвищенню ефективності роботи баштового крана. Їхнє врахування дозволяє організувати безперебійну, точну і безпечну роботу, що значно підвищує продуктивність та економічну ефективність крана.

4.2 Розрахунок економічної ефективності від застосування системи оптимального керування

Для розрахунку економічної ефективності за рахунок підвищення енергоефективності роботи механізму підйому вантажу проведемо додаткові дослідження [23] циклу. Сутність цих додаткових досліджень полягає у тому, щоб розрахувати величини енерговитрат при переміщенні вантажу для механізму підйому вантажу обладнаного стандартною системою керування та системою керування, яка розраховує оптимальне керування переміщенням

вантажу за допомогою LQR-регулятора. Відмінність між вказаними системами керування на апаратному рівні відсутня, вона проявляється лише на рівні алгоритмів керування. Отже, у представленому нижче економічному розрахунку відсутні показники капітальних вкладень на впровадження нового обладнання та його налаштування.

Розрахунок енерговитрат на виконання циклу переміщення вантажу проводився за такою формулою:

$$E = \int_0^{T_{\text{цикл}}} P dt \quad (11.2)$$

де P – потужність, яка споживається з мережі приводним двигуном, Вт;

$T_{\text{цикл}}$ – тривалість циклу підйому вантажу, сек.;

Зазначимо, що для оптимального руху, який реалізовано за допомогою частотного керування електроприводом швидкість ідеального холостого ходу є функцією часу.

У результаті проведення розрахунків встановлено, що енерговитрати для одного циклу переміщення вантажу масою 200 кг, яке виконує механізм підйому вантажу зі стандартними ваговими коефіцієнтами, складає 0,00868 кВт·год. Аналогічний показник для механізму підйому вантажу, який виконує рух з оптимальними ваговими коефіцієнтами рівний 0,00116 кВт·год. Отже, економія електроенергії за один цикл переміщення вантажу при переході на оптимальне керування складає 0,00572 кВт·год.

Далі, було розраховано споживання електроенергії у випадку переміщення вантажу масою 8 тон. Для руху механізму з стандартним керуванням воно рівне 0,00608 кВт·год, а для руху механізму з оптимальним регулятором енерговитрати рівні 0,00086 кВт·год. Виходить, що у цьому випадку економія електроенергії за один цикл переміщення вантажу при переході на оптимальне керування складає 0,00522 кВт·год.

Для визначення вартості електроенергії, що вдалось зекономити, необхідно її величину помножити на вартість тарифу на електроенергію, який для промислових споживачів другого класу напруги з врахуванням ПДВ становить 848,13 коп/кВт·год [24]. Споживачі цього класу отримують від електропостачальної організації електричну енергію з рівнем напруги нижче 27,5 кВ. Подальший розрахунок виконано для підприємств, які мають другий клас напруги, так як велика частина підприємств споживають електроенергію з мережі 10 кВ. Виходячи з цього, вартість зекономленої електроенергії становить: 0,0048 грн/цикл – для переміщення вантажу масою 200 кг; 0,0044 грн/цикл – для переміщення вантажу масою 8 тон.

Для визначення економічної ефективності за весь період роботи механізму підйому вантажу необхідно вартість зекономленої електроенергії перемножити з кількістю циклів підйому-опускання вантажу. Для цього зазначимо, що механізм підйому за весь час експлуатації виконує від $16 \cdot 10^3$ до $5 \cdot 10^6$ циклів. Тоді при підйомі вантажу масою 200 кг вартість зекономленої електроенергії за весь період експлуатації механізму підйому вантажу знаходиться у діапазоні 76,8...24000 грн. Розрахунки для переміщення вантажів масою 8 тон показують, що вартість зекономленої електроенергії складає 70,4...22000 грн.

Таким чином, економічна ефективність використання оптимальних законів руху механізму підйому вантажу досягається при інтенсивній експлуатації крана.

РОЗДІЛ 5. ПРАВИЛА ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ

5.1 Класифікація небезпечних факторів під час виконання технологічних операцій

Працюючи з баштовим краном необхідно пам'ятати, що це складний і відповідальний процес, який вимагає уваги до різних факторів. Згрупувавши та класифікувавши ці факторів, можна уникнути шкоди як людям так і техніці, а також попередити їх виникнення.

Небезпечні фактори під час роботи з підйомним механізмом баштового крана діляться на декілька типів: механічні, технічні, фізичні, погодні, організаційні та людські.

1. Механічні ризики.

Одним із найсерйозніших ризиків, що може виникнути на будівельному майданчику це падіння вантажу, якщо вантаж погано закріплений або кабель має дефекти. У таких випадках в залежності від маси вантажу та висоти підйому це може пошкодити обладнання або травмувати людей.

Також дуже небезпечною є несправність гальмівного механізму, що може призвести до неконтрольованого руху вантажу, особливо небезпечного на великих висотах або під час швидкого переміщення.

Під час підйому вантаж може почати розгойдуватися через вітер або різкі рухи через це можуть відбутись удари по будівлях або конструкціях, що ще більше підвищує ризик аварій.

2. Фізичні фактори.

Через тривалий період експлуатації механізмів ізоляція проводів може бути пошкоджена або після обслуговування обладнання може бути неправильно підключене, що створює ризик ураження персоналу електричним струмом, особливо під час дощу або інших опадів.

Постійний шум роботи двигунів і механізмів крана може не тільки відволікати оператора, але й негативно впливати на його слух. Через

виникнення додаткових вібрацій в механізмах може знижуватись стійкість крана і погіршуватись умови роботи.

3. Погодні умови.

Сильний вітер може розгойдувати вантаж та навіть спричинити перекидання крана. Це особливо небезпечно під час підйому великих або важких вантажів.

Екстремальні температури або мокрі від опадів кабелі можуть дестабілізувати роботу механізму підйому вантажу підвищуючи ризик аварій.

4. Організаційні фактори.

Для складних завдань необхідно залучати досвідчених операторів тому, що недостатньо навчений оператор може неправильно оцінити ситуацію та допустити помилку під час виконання операцій.

Обов'язково притримуватись застережень на рахунок правил. Недотримання правил безпеки таких як перевищення навантаження або ігнорування стандартних процедур можуть легко призвести до плачевних випадків.

На будівельному майданчику обов'язково потрібно носити захисний шолом для уникнення травм голови та світловідбивний жилет для більшої помітності та зменшені ризику травм через неухважність. Без касок та іншого захисного спорядження персонал на майданчику наражається на підвищений ризик травм.

5. Технічні проблеми

Зношеність обладнання може створити величезні проблеми через великий деструктивний характер. Старі троси, механізми, що довго не обслуговувалися, або ті, що вже пошкоджені компоненти можуть стати причиною серйозних несправностей.

Також можлива відмова сенсорів та систем контролю. У випадку якщо датчики або система контролю працюють неправильно, оператор може

отримати хибну інформацію, що підвищує ризик неправильних рішень та помилок.

6. Людський фактор

Втома та стрес дуже заважають роботі оператора. Помилки можуть бути пов'язаними з високим стресом або фізичними навантаженнями, що може призвести до втрати концентрації та збільшити ймовірність помилок. Через це оператору необхідно працювати за обмеженим графіком, щоб уникнути небезпек.

Знаючи про всі ці фактори, можна передбачити можливі ризиків і вжити заходів для їх уникнення, що забезпечить безпеку та ефективність роботи з баштовим краном.

5.2 Заходи техніки безпеки

Основні заходи безпеки при роботі з підйомним механізмом баштового крана.

Працювати з баштовим краном — це серйозна і відповідальна задача, яка вимагає уважності й дотримання техніки безпеки. Щоб запобігти небезпечним ситуаціям і забезпечити безпечну роботу всіх співробітників, важливо враховувати низку заходів безпеки.

Перед тим як починати роботу, обов'язково слід перевірити стан кабелів, гальмівної системи та всіх інших механізмів крана на наявність дефектів. Виявлені несправності необхідно усунути, щоб уникнути поломок під час роботи. Крім цього оператор повинен переконатися, що кран було встановлено на рівній і твердій поверхні перед початком його експлуатації. Це допомагає запобігти нахилу чи перекиданню крана.

Вантаж, який підніматиметься, не повинен перевищувати допустиму норму для даної моделі крана. Перевантаження може призвести до несправності

механізмів, обриву канату або інших наслідків для людей навколо. Люди, які знаходяться біля крана, не повинні бути в місці роботи з вантажем, щоб уникнути ризику травм спричинених самим вантажем або частинами крана в разі аварії.

Щоб уникнути ударів вантажем в навколишні конструкції або перекидання вантажу під час підйому оператору важливо слідкувати за рухом. Підйом і спуск мають відбуватись плавно, без різких зупинок чи прискорень, щоб зменшити розгойдування вантажу. Цей процес забезпечує контролер. В разі нестабільної роботи необхідно її припинити та викликати спеціаліста для перевірки обладнання.



Рисунок 4.1 – Баштовий кран, що впав на ближню будівлю

При швидкості вітру вище встановлених норм (близько 10-12 м/с) роботу краще припинити. Вітер не має розгойдувати вантаж, щоб він не впав, що особливо небезпечно на великих висотах. Також слід ставитися з обережністю до інших зовнішніх факторів як дощ, сніг або температурні перепади слід контролювати їх вплив. Мокрі троси можуть ковзати, а надто низькі або високі температури погано впливають на стан механізмів.

Завжди важливо перевіряти, чи справна ізоляція електропроводки, особливо на вологих будівельних майданчиках, а перед тим як ремонтувати кран, його обов'язково потрібно відключити від живлення, щоб уникнути випадкового ураження струмом.

Оператор повинен мати належну підготовку і знати правила безпеки. Крім цього він постійно має проходити курси з підтвердження кваліфікації. Це допоможе швидко і правильно оцінювати ситуацію на майданчику. Проте бувають випадки, коли навіть досвідченим працівникам інструктажі для оновлення знань і дотримання нових вимог безпеки.

Усі працівники поблизу крана повинні носити каски жилети для легкої помітності, а оператор має використовувати захисні рукавички та спецодяг. Крім цього якщо оператор працює на висоті, то йому слід використовувати захисні ремені, щоб уникнути падіння.



Рисунок 4.2 – Правильна екіпіровка на будівельному майданчику

Кожен працівник повинен пройти інструктаж, щоб знати, що робити в разі аварії, наприклад, якщо вантаж впаде або кран втратить стійкість, а разі

несправності оператор повинен натиснути кнопку живлення для швидкого відключення в екстреній ситуації, що негайно зупинить всі операції.

Дотримання заходів з техніки безпеки — основа стабільної роботи. Такі заходи допомагають мінімізувати ризики та уникати неприємних ситуацій, захищаючи людей і забезпечуючи ефективну роботу обладнання.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі представлено комплексне дослідження для розробки системи керування підйомним механізмом роботизованого баштового крана. Проведено аналіз науково-технічних публікацій, що дозволило визначити ключові методи для ефективного керування, включаючи анти-коливальні технології та підходи з оптимізацією енергоспоживання.

Основним завданням стало застосування алгоритму оптимального керування на основі LQR (лінійного квадратичного регулятора). Цей спосіб забезпечує зменшення вживаної потужності при оптимальному керуванні в середньому до 180 Вт, рушійну силу до 1700 Н.

У розділі розробки схеми системи побудовано структурну модель з урахуванням всіх елементів (сенсори, контролер, приводи), яка забезпечує плавність та безпечність операцій. Це дозволяє інтегрувати систему в роботизований баштовий кран, підвищуючи точність підйому в складних умовах.

Розрахунок економічних показників продемонстрував, що використання LQR дозволило створити систему, яка економить електроенергію в діапазоні 87,5...27350 кВт·год в залежності від кількості циклів експлуатації, завдяки оптимізації параметрів руху, що робить кран більш економічним підвищуючи рентабельність та конкурентоспроможність проекту.

Дотримання техніки безпеки забезпечує захист персоналу та знижує ризик аварій, підвищуючи надійність роботи. Загалом, результати роботи підтверджують, що розроблена система керування відповідає вимогам точності, енергоефективності та безпеки й має значний практичний потенціал для застосування в сучасних будівельних кранах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Баштовий кран [Електронний ресурс] // Wikipedia. – 2021. – Режим доступу до ресурсу:
https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwid6J7jkciJAxU6HxAIHcXYLUsQFnoECBwQAQ&url=https%3A%2F%2Fuk.wikipedia.org%2Fwiki%2F%25D0%2591%25D0%25B0%25D1%2588%25D1%2582%25D0%25BE%25D0%25B2%25D0%25B8%25D0%25B9_%25D0%25BA%25D1%2580%25D0%25B0%25D0%25BD&usg=AOvVaw2T-XNebpzmvf272NWctPOv&opi=89978449.
2. Brain M. How Tower Cranes Work [Електронний ресурс] / Marshall Brain. – 2023. – Режим доступу до ресурсу:
<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjE-Ivn4seJAxXH2QIHhf0FOPsQFnoECBgQAQ&url=https%3A%2F%2Fscience.howstuffworks.com%2Ftransport%2Fengines-equipment%2Ftower-crane.htm&usg=AOvVaw0Ox6Sjevmm4eSi9RfBdrze&opi=89978449>.
3. Механізм підйомника та запчастини [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:
https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwisp_iR-smJAxVIxQIHNYodCmkQFnoECBYQAQ&url=https%3A%2F%2Fuk.bq-cranes.com%2Fhoisting-mechanism-and-spare-parts%2F&usg=AOvVaw21yft3cECUYtJekGIoLLPG&opi=89978449.
4. Перетворювачі частоти для кранів [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:
<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiB0p3T9cmJAxXx1wIHHeM7FJ4QFnoECBcQAQ&url=https%3A%2F%2Fspace.com.ua%2Fcollections%2Ffrequency-inverters-cranes%3Fsrsltid%3DAfmBOoqWH3pomtf3mGK8UW-oNbPf->

[IasGwng_TYCa7jF2oCdGszVN1Yi&usg=AOvVaw3kfJInZdEMu6Wn_zKJNDkC&opi=89978449.](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiB0p3T9cmJAxXx1wIHHeM7FJ4QFnoECBYQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.galautomatics.com.ua%2Fuk%2Fworks%2Fchp-dlya-kranov%2F&usg=AOvVaw36n6pUCJCirU7bHsAsoyCm&opi=89978449)

5. Частотний перетворювач для кранів [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:

[https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiB0p3T9cmJAxXx1wIHHeM7FJ4QFnoECBYQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.galautomatics.com.ua%2Fuk%2Fworks%2Fchp-dlya-kranov%2F&usg=AOvVaw36n6pUCJCirU7bHsAsoyCm&opi=89978449.](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiB0p3T9cmJAxXx1wIHHeM7FJ4QFnoECBYQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.galautomatics.com.ua%2Fuk%2Fworks%2Fchp-dlya-kranov%2F&usg=AOvVaw36n6pUCJCirU7bHsAsoyCm&opi=89978449)

6. Khoshnazar M. Using a robust mu-synthesis based controller to eliminate the adverse effects of uncertainties and external disturbances in nonlinear 3D overhead cranes with hoisting mechanism / M. Khoshnazar, A. Barjini. // *Meccanica*. – 2024. – №59. – С. 1517–1538.

7. Semenyuk V. Optimization of the Lifting Machines' Hoisting Mechanism Design Scheme / V. Semenyuk, O. Vudvud. // *Advanced Manufacturing Processes*. – 2023. – №5. – С. 94–104.

8. Bin Z. Research on the Hoisting Motor Drive System's Active Disturbance Rejection Control and Energy Consumption for a Crane / Z. Bin, M. Lili. // *IEEE Access*. – 2021. – №9. – С. 338–351.

9. Fasih ur Rehman S. Input shaping with an adaptive scheme for swing control of an underactuated tower crane under payload hoisting and mass variations / S. Fasih ur Rehman, Z. Mohamed. // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2022. – №175. – С. 106–109.

10. Haniszewski T. Energy Harvesting in the Crane-Hoisting Mechanism / T. Haniszewski, M. Cieśla. // *Energies*. – 2022. – №15. – С. 1–22.

11. Zheng L. Design and Simulation on the Intelligent Operation System of Crane / Lin Zheng. // *Lecture Notes in Electrical Engineering*. – 2023. – №1059. – С. 317–322.

12. Unmanned driving control system and unmanned driving control method for tower crane [Електронний ресурс] // CN116853970A. – 2023. – Режим доступу

до

ресурсу:

<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/088224800/publication/CN116853970A?q=optimal%20control%20of%20the%20hoisting%20mechanism%20tower%20crane>.

13. Intelligent control system for tower crane [Электронный ресурс] // CN112777497A. – 2021. – Режим доступа до ресурсу: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/075761008/publication/CN112777497A?q=optimal%20control%20of%20the%20hoisting%20mechanism%20tower%20crane>.

14. Group tower system and group tower crane transportation path optimization method [Электронный ресурс] // CN114715799A. – 2022. – Режим доступа до ресурсу: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/075761008/publication/CN112777497A?q=optimal%20control%20of%20the%20hoisting%20mechanism%20tower%20crane>.

15. Efficient object lifting method and system of tower crane [Электронный ресурс] // CN113321143B. – 2021. – Режим доступа до ресурсу: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/077415422/publication/CN113321143A?q=optimal%20control%20of%20the%20hoisting%20mechanism%20tower%20crane>.

16. Mechanical tower crane control device [Электронный ресурс] // CN109809304A. – 2019. – Режим доступа до ресурсу: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/066599503/publication/CN109809304A?q=optimal%20control%20of%20the%20hoisting%20mechanism%20tower%20crane>.

17. Automatic driving system of tower crane and tower crane [Электронный ресурс] // CN214399559U. – 2021. – Режим доступа до ресурсу: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/078024500/publication/CN214399559U>.

[399559U?q=optimal%20control%20of%20the%20hoisting%20mechanism%20tower%20crane](https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/082260242/publication/US2023159308A1?q=optimal%20control%20of%20the%20hoisting%20mechanism%20tower%20crane).

18. AUTOMATIC HOISTING AND TRANSPORTING METHOD FOR TOWER CRANE [Електронний ресурс] // WO2022143193A1. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/082260242/publication/US2023159308A1?q=optimal%20control%20of%20the%20hoisting%20mechanism%20tower%20crane>.

19. Intelligent auxiliary driving method for tower crane [Електронний ресурс] // CN116216525A. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/086582458/publication/CN116216525A?q=optimal%20control%20of%20the%20hoisting%20mechanism%20tower%20crane>.

20. Automatic tower crane control method and system based on man-machine co-fusion [Електронний ресурс] // CN117446670B. – 2024. – Режим доступу до ресурсу: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/089593220/publication/CN117446670A?q=optimal%20control%20of%20the%20hoisting%20mechanism%20tower%20crane>.

21. System and method for transporting a swaying hoisted load [Електронний ресурс] // US11987475B2. – 2024. – Режим доступу до ресурсу: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/089593220/publication/CN117446670A?q=optimal%20control%20of%20the%20hoisting%20mechanism%20tower%20crane>.

22. ДИНАМІЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ МЕХАНІЗМУ ПІДЙОМУ ВАНТАЖУ МОСТОВИХ КРАНІВ [Електронний ресурс] // Монографія. – 2015. – Режим доступу до ресурсу: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u132/Монографія_Динамічна%20оптимізація%20механізму%20підйому%20вантаж%20мостових%20кранів.pdf.

23. Ловейкін В. С. Динаміка та оптимальне керування рухом мостових кранів. Монографія [Електронний ресурс] / В. С. Ловейкін, Ю. О. Ромасевич, В. А. Голдун // ЦП „КОМПРІНТ”. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjK0bj_iteJAxV7PxAIHT3ZCTgQFnoECBgQAQ&url=https%3A%2F%2Fnbip.edu.ua%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Fu132%2Fmonografiya_loveykin_romasevich_goldun_krushelnickiy.pdf&usg=AOvVaw04U9n2oS_rv6XOhfICUa9c&opi=89978449.

24. Рівні цін на універсальні послуги для побутових та малих непобутових споживачів, у тому числі для побутових та малих непобутових споживачів, які є користувачами малої системи розподілу, що вводяться в дію з 01 грудня 2024 року [Електронний ресурс] // ТОВ \"Київська обласна енергопостачальна компанія\". – 2024. – Режим доступу до ресурсу: <https://koec.com.ua/page?root=23>.

ДОДАТКИ

```
SSM = StateSpaceModel[{m1 * x1''[t] + c1 * (x1[t] - x2[t]) + b1 * (x1'[t] - x2'[t]) == F[t], c1 * (x1[t] - x2[t]) + b1 * (x1'[t] - x2'[t]) == m2 * (x2''[t] + g)},
  [модель у просторі станів
```

```
{(x1[t], 0), (x2[t], 0), (x1'[t], 0), (x2'[t], 0)}, {{F[t], 0}}, {x2[t]}, t]
```

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -c_1 & c_1 & -b_1 & b_1 & 1 \\ -\frac{c_1}{m_1} & \frac{c_1}{m_1} & -\frac{b_1}{m_1} & \frac{b_1}{m_1} & \frac{1}{m_1} \\ c_1 & -c_1 & b_1 & -b_1 & 0 \\ m_2 & m_2 & m_2 & m_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{matrix} S \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{matrix}$$

РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ ЗНАХОДЖЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ЛІНІЙНО-КВАДРАТИЧНОГО (LQR) РЕГУЛЯТОРА

```
(*
```

```
Задання чисельних параметрів. Розрахувати декілька варіантів:
```

- 1) довжина гнучкого підвісу 2 м і маса вантажу 200 кг;
- 2) довжина гнучкого підвісу 12 м і маса вантажу 200 кг;
- 3) довжина гнучкого підвісу 12 м і маса вантажу 8000 кг;
- 4) довжина гнучкого підвісу 2 м і маса вантажу 8000 кг;

```
c1 = 5 * 10^4;
```

```
b1 = 0.05 * c1;
```

```
m2 = 8000;
```

```
(=Зведена маса механізму підйому вантажу*)
```

```
m1 = 10000;
```

```
(*
```

```
Тут треба погратися із коефіцієнтами  $\delta R$ ,  $\delta Position$  та  $\delta Velocity$  так, щоб:
```

- 1) перерегулювання швидкості крана не було великим (в ідеалі нульовим); 2) мінімізувати піки споживаної потужності; 3) перехідний процес (вихід швидкості крана на номінальну швидкість) не був довгим. Ці вимоги знаходяться в протиріччі, тому треба вибирати компроміс. Всі вимоги ранжовані у порядку важливості.

```
Необхідно скласти таблицю - номер варіанту / рекомендовані значення вагових коефіцієнтів
```

```
*)
```

```
 $\delta R = 5 * 10^{-7}$ ;
```

```
 $\delta Position = 1 * 10^{-5}$ ;
```

```
 $\delta Velocity = 1 * 10^5$ ;
```

```
{**} (*
```

```
 $\delta R = 5 * 10^{-2}$ ;
```

```
 $\delta Position = 1 * 10^4$ ;
```

```
 $\delta Velocity = 1 * 10^6$ ;
```

```
*)
```

```
(*Матриця вагових коефіцієнтів інтегрального критерію оптимізації - біля фазових змінних*)
```

```
Q = DiagonalMatrix[{ $\delta Position$ ,  $\delta Position$ ,  $\delta Velocity$ ,  $\delta Velocity$ ]};
```

```
[діагональна матриця
```

```
(*Матриця вагових коефіцієнтів інтегрального критерію оптимізації - біля керування*)
```

```
R = {{ $\delta R$ }};
```

```
(*Розрахунок коефіцієнтів оптимального регулятора*)
```

```
Print ["Коефіцієнти лінійно-квадратичного оптимального регулятора руху механізму підйому вантажу"]
```

```
[надрукувати
```

```
(*Розрахунок коефіцієнтів оптимального регулятора - ці дані необхідно занести у записку.*)
```

```
K = LQRegulatorGains [SSM, {Q, R}]
```

```
[лік коефіцієнти підсилення зворотного зв'язку
```

```
(*System with LQR-controller*)
```

```
sysLQR = SystemsModelStateFeedbackConnect [SSM, K];
```

```
[з'єднання моделі та контролера зі зворотним зв'язком
```

```
(*Номінальна швидкість підйому вантажу*)
```

```
v = 0.25;
```

```
(*Тривалість розгону*)
```

```
t1 = 2;
```

```
InitialStateVector = List [ - $\frac{v * t1}{2}$ , - $\frac{v * t1}{2}$ , -v, -v ];
```

$T = 4;$

$ImSize = 350;$ $TextSize = 12;$ $AspRatio = 0.7;$

$u = - (K.StateResponse[{\text{SystemsModelStateFeedbackConnect}[SSM, K], \text{InitialStateVector}], \{0\}, \{t, T\}][1];$
[відгук змінних стану] [з'єднання моделі та контролера зі зворотним зв'язком]

$x_1 = \text{StateResponse}[{\text{sysLQR}, \text{InitialStateVector}], \{0, 0\}, \{t, T\}][1];$
[відгук змінних стану]

$x_2 = \text{StateResponse}[{\text{sysLQR}, \text{InitialStateVector}], \{0, 0\}, \{t, T\}][2];$
[відгук змінних стану]

$dx_1 = \text{StateResponse}[{\text{sysLQR}, \text{InitialStateVector}], \{0, 0\}, \{t, T\}][3];$
[відгук змінних стану]

$dx_2 = \text{StateResponse}[{\text{sysLQR}, \text{InitialStateVector}], \{0, 0\}, \{t, T\}][4];$
[відгук змінних стану]

$\text{ConsumedPower} = (v + dx_1) * u;$

$\text{Plot}[u, \{t, 0, T\}, \text{Frame} \rightarrow \text{True}, \text{ImageSize} \rightarrow \text{ImSize},$

графік функції [рамка] [істина] [розмір зображення]
 $\text{FrameLabel} \rightarrow \{\text{Text}[\text{Style}["t, c", \text{FontSize} \rightarrow \text{TextSize}, \text{Italic}, \text{Bold}, \text{Black}], \text{Text}[\text{Style}["F, H", \text{FontSize} \rightarrow 12, \text{Italic}, \text{Bold}, \text{Black}]]],$
[позначка для r] [текст] [стиль] [розмір шрифту] [курсив] [жир] [чорний] [текст] [стиль] [розмір шрифту] [курсив] [жир] [чорний]

$\text{AspectRatio} \rightarrow \text{AspRatio}, \text{PlotStyle} \rightarrow \{\text{Thickness}[0.007], \text{Black}\}, \text{GridLines} \rightarrow \text{Automatic}, \text{PlotRange} \rightarrow \text{All}, \text{AxesOrigin} \rightarrow \{0, 0\}$
[аспектне відношення] [стиль графіка] [товщина] [чорний] [лінії координат] [автоматичний] [діапазон зна] [все] [точка перетину осей]

$\text{Plot}[\text{ConsumedPower}, \{t, 0, T\}, \text{Frame} \rightarrow \text{True}, \text{ImageSize} \rightarrow \text{ImSize},$

графік функції [рамка] [істина] [розмір зображення]
 $\text{FrameLabel} \rightarrow \{\text{Text}[\text{Style}["t, c", \text{FontSize} \rightarrow \text{TextSize}, \text{Italic}, \text{Bold}, \text{Black}], \text{Text}[\text{Style}["P, Вт", \text{FontSize} \rightarrow 12, \text{Italic}, \text{Bold}, \text{Black}]]],$
[позначка для r] [текст] [стиль] [розмір шрифту] [курсив] [жир] [чорний] [текст] [стиль] [розмір шрифту] [курсив] [жир] [чорний]

$\text{AspectRatio} \rightarrow \text{AspRatio}, \text{PlotStyle} \rightarrow \{\text{Thickness}[0.007], \text{Black}\}, \text{GridLines} \rightarrow \text{Automatic}, \text{PlotRange} \rightarrow \text{All}, \text{AxesOrigin} \rightarrow \{0, 0\}$
[аспектне відношення] [стиль графіка] [товщина] [чорний] [лінії координат] [автоматичний] [діапазон зна] [все] [точка перетину осей]

$\text{ParametricPlot}[\{x_1 - x_2, dx_1 - dx_2\}, \{t, 0, T\}, \text{Frame} \rightarrow \text{True}, \text{ImageSize} \rightarrow \text{ImSize},$

графік параметрично заданої області на площині [рамка] [істина] [розмір зображення]
 $\text{FrameLabel} \rightarrow \{\text{Text}[\text{Style}["x_1 - x_2, м", \text{FontSize} \rightarrow \text{TextSize}, \text{Italic}, \text{Bold}, \text{Black}], \text{Text}[\text{Style}["x_1 - x_2, м/с", \text{FontSize} \rightarrow 12, \text{Italic}, \text{Bold}, \text{Black}]]],$
[позначка для r] [текст] [стиль] [розмір шрифту] [курсив] [жир] [чорний] [текст] [стиль] [розмір шрифту] [курсив] [жир] [чорний]

$\text{AspectRatio} \rightarrow \text{AspRatio}, \text{PlotStyle} \rightarrow \{\text{Thickness}[0.007], \text{Black}\}, \text{GridLines} \rightarrow \text{Automatic}, \text{PlotRange} \rightarrow \text{All}, \text{AxesOrigin} \rightarrow \{0, 0\}$
[аспектне відношення] [стиль графіка] [товщина] [чорний] [лінії координат] [автоматичний] [діапазон зна] [все] [точка перетину осей]

$\text{pLQRState} = \text{Plot}[v + dx_1, \{t, 0, T\}, \text{Frame} \rightarrow \text{True}, \text{ImageSize} \rightarrow \text{ImSize},$

графік функції [рамка] [істина] [розмір зображення]
 $\text{FrameLabel} \rightarrow \{\text{Text}[\text{Style}["t, c", \text{FontSize} \rightarrow \text{TextSize}, \text{Italic}, \text{Bold}, \text{Black}], \text{Text}[\text{Style}["x_1(t), м/с", \text{FontSize} \rightarrow 12, \text{Italic}, \text{Bold}, \text{Black}]]],$
[позначка для r] [текст] [стиль] [розмір шрифту] [курсив] [жир] [чорний] [текст] [стиль] [розмір шрифту] [курсив] [жир] [чорний]

$\text{AspectRatio} \rightarrow \text{AspRatio}, \text{PlotStyle} \rightarrow \{\text{Thickness}[0.007], \text{Black}\}, \text{GridLines} \rightarrow \text{Automatic}, \text{PlotRange} \rightarrow \text{All}, \text{AxesOrigin} \rightarrow \{0, 0\}$
[аспектне відношення] [стиль графіка] [товщина] [чорний] [лінії координат] [автоматичний] [діапазон зна] [все] [точка перетину осей]

Наведені нижче дані необхідно занести у таблиці для кожного знайденого розв'язку задачі (для всіх варіантів маси вантажу та довжини гнучкого підвісу).

$uTable = \text{Table}[u /. t \rightarrow \tau, \{\tau, 0, T, 0.005\}];$

[таблиця значень]

$\text{ConsumedPowerTable} = \text{Table}[\text{ConsumedPower} /. t \rightarrow \tau, \{\tau, 0, T, 0.005\}];$

[таблиця значень]

$x1Table = \text{Table}[x_1 /. t \rightarrow \tau, \{\tau, 0, T, 0.005\}];$

[таблиця значень]

$x2Table = \text{Table}[x_2 /. t \rightarrow \tau, \{\tau, 0, T, 0.005\}];$

[таблиця значень]

$dx1Table = \text{Table}[dx_1 /. t \rightarrow \tau, \{\tau, 0, T, 0.005\}];$

[таблиця значень]

$dx2Table = \text{Table}[dx_2 /. t \rightarrow \tau, \{\tau, 0, T, 0.005\}];$

[таблиця значень]

(←КЛАС СЕРЕДНЬОКВАДРАТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ→)

$\text{Print}["\text{Середньоквадратичне значення рушійного зусилля, Н}"]$

[надрукувати]

$$\sqrt{\frac{\text{NIntegrate}[u^2, \{t, 0, T\}]}{T}}$$

```
Print["Середньоквадратичне значення потужності, Вт"]
```

```
|надрукувати
```

$$\sqrt{\frac{N\text{Integrate}[\text{ConsumedPower}^2, \{t, 0, T\}]}{T}}$$

```
Print["Середньоквадратичне значення пружної деформації каната, м"]
```

```
|надрукувати
```

$$\sqrt{\frac{N\text{Integrate}[(x_1 - x_2)^2, \{t, 0, T\}]}{T}}$$

```
(*КЛАС МАКСИМАЛЬНИХ ПОКАЗНИКІВ*)
```

```
Print["Максимальне значення рушійного зусилля, Н"]
```

```
|надрукувати
```

```
Abs[Max[uTable]]
```

```
|аб--|максимум
```

```
Print["Максимальне значення потужності, Вт"]
```

```
|надрукувати
```

```
Abs[Max[ConsumedPowerTable]]
```

```
|аб--|максимум
```

```
Print["Максимальне значення потужності, Вт"]
```

```
|надрукувати
```

```
Abs[Max[ConsumedPowerTable]]
```

```
|аб--|максимум
```

```
Print["Максимальне значення пружної деформації каната, м"]
```

```
|надрукувати
```

```
Abs[Max[x1Table - x2Table]]
```

```
|аб--|максимум
```