

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет(ННІ) _____

КОНСТРУЮВАННЯ ТА ДИЗАЙНУ

УДК 621.873.11

ПОГОДЖЕНО

Декан факультету (Директор ННІ)

конструювання та дизайну
(назва факультету (ННІ))

(підпис)

Зіновій РУЖИЛО

(ПІБ)

“ ” _____ 2024 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри

конструювання машин і обладнання
(назва кафедри)

(підпис)

Вячеслав ЛОВЕЙКІН

(ПІБ)

“ ” _____ 2024 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МЕХАНІЗМОМ
ЗМІНИ ВІЛЬОТУ РОБОТИЗОВАНОГО БАШТОВОГО КРАНУ

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 КРУЩЕЛЬНИЦЬКИЙ
(ПІБ)

Виконав

(підпис)

Паламарчук Владислав Олександрович

(ПІБ студента)

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

конструювання машин і обладнання

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

“ _____ ” _____ 2024 року

З А В Д А Н Н Я

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ

ПАЛАМАРЧУК ВЛАДИСЛАВ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність _____ **133 – Галузеве машинобудування** _____

(код і назва)

Освітня програма _____ **Робототехнічні системи і комплекси сільськогосподарського** _____

(назва)

виробництва _____

Орієнтація освітньої програми _____ **освітньо-професійна** _____

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської кваліфікаційної роботи **РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ
МЕХАНІЗМОМ ЗМІНИ ВІЛЬОТУ РОБОТИЗОВАНОГО БАШТОВОГО
КРАНУ**

затверджена наказом ректора НУБіП України від “ **29** ” **грудня** **2023** р. № **2400 “С”**

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 системи 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 _____

(підпис)

Паламарчук В.О.

(прізвище та ініціали студента)

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	5
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1	9
Аналіз літератури	9
1.1. Кількісний аналіз публікацій	9
1.2 Загальна інформація про баштові крани	10
1.3 Вимоги до елементів баштових кранів	22
1.4 Аналіз механізмів зміни вильоту баштових кранів	26
РОЗДІЛ 2	33
Розробка оптимального керування механізмом зміни вильоту роботизованого баштового крану	33
2.1. Постановка задачі оптимального керування	33
2.2. Розв’язання задачі оптимального керування	38
2.2.1. Розрахунок оптимального LQ регулятора для першої конфігурації системи	40
2.2.2. Розрахунок оптимального LQ регулятора для другої конфігурації системи	45
2.2.3. Розрахунок оптимального LQ регулятора для третьої конфігурації системи	49
2.2.4. Розрахунок оптимального LQ регулятора для четвертої конфігурації системи	54
2.3. Аналіз отриманих даних з чотирьох експериментів	59
РОЗДІЛ 3	62
Розробка апаратної частини системи оптимального керування механізмом зміни вильоту роботизованого баштового крану	62
3.1. Розробка структурної схеми системи керування	62
3.2. Розробка рекомендацій стосовно апаратної частини системи	67
РОЗДІЛ 4	73
Розрахунок економічної ефективності розробленої оптимальної системи керування	73
4.1 Фактори, які впливають на підвищення ефективності виконання технологічних операцій	73
4.2 Економічна доцільність покращення	74

РОЗДІЛ 5	79
Охорона праці	79
5.1. Робота з кваліфікованими кадрами	79
5.2. Розробка планів з техніки безпеки	80
5.3. Технічне обслуговування	83
5.4. Врахування погодних умов	85
5.5. Ідентифікація	87
5.6. Огляд технічного стану з допомогою БПЛА	88
5.7. Пристрої безпеки баштового крана	90
ВИСНОВКИ	93
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	95

РЕФЕРАТ

Представлена магістерська кваліфікаційна робота складається з пояснювальної записки, що містить вступ, п'ять розділів, висновки, список використаних джерел та додатки. Основний обсяг роботи виконано на 98 аркушах друкованого тексту, на 8 сторінках наведено додатки до роботи. Текст містить 62 рисунка і одну таблицю. В ході проведення аналізу було використано 29 літературних джерел, що наведені після висновків.

Мета роботи полягає у розробці системи оптимального керування механізмом зміни вильоту роботизованого баштового крану. Використання роботизованих систем в баштовому крані дасть змогу зменшити коливання вантажу, отримати оптимальні режими руху, що в свою чергу збільшує економічність, точність та безпеку використання машини. Такі вимоги до системи оптимального керування досягаються за рахунок налаштування параметрів LQR регулятора, який, в свою чергу, керує системою шостого порядку. Такий підхід дозволяє гнучко контролювати вихідний сигнал, що керує прискоренням рушійного моменту.

Об'єктом дослідження магістерської кваліфікаційної роботи є роботизований баштовий кран, а саме його механізм зміни вильоту, що складається з ряду компонентів, які в синергії одне з одним забезпечують ефективно та безпечно переміщення вантажу по необхідній траєкторії.

Предметом дослідження є розробка системи оптимального керування механізмом зміни вильоту роботизованого баштового крану. Така система дозволить уникнути впливу людського фактору на процес керування, що в свою чергу надає великий ряд переваг над звичайним баштовим краном: збільшення точності переміщення, зменшення травматизму та виключення зіткнень вантажу чи стріли з перешкодами, покращення швидкодії, оптимальне використання енергетичних ресурсів та ін.

В першому розділі даної роботи розглядається баштовий кран, його конструкція, галузі застосування та особливості монтажу. Проведено аналіз літератури.

В другому розділі описується та розв'язується задача створення лінійно-квадратичного регулятора руху. Синтезовано оптимальний регулятор руху для механізму зміни вильоту роботизованого баштового крану.

Третій розділ містить інформацію про апаратну частину описаного вдосконалення. Наведено приклади сенсорів, датчиків та мікроконтролерів, що можуть бути використані для реалізації такої системи керування.

В четвертому розділі наведено розрахунки економічної доцільності введення розробленої системи керування.

П'ятий розділ присвячено питанню охорони праці. Описано які заходи необхідно проводити для уникнення небезпечних ситуацій. Наведено також метод проведення огляду складових компонентів баштового крану за допомогою БПЛА.

В дослідженні використані наступні наукові методи:

1. Запис простору станів – у теорії керування один з основних методів опису поведінки динамічної системи;
2. Матричні методи розрахунків;
3. Інтегральне та диференціальне числення;
4. Методи оптимального керування;
5. Статистичний аналіз;

Ключові слова: баштовий кран, механізм зміни вильоту, механізм переміщення візка, система оптимального керування, LQR регулятор, автоматизація, горизонтальна стріла, точність переміщення, зменшення коливань, потужність приводу.

ВСТУП

Сучасні баштові крани відіграють досить важливу роль у будівельній галузі. Вони забезпечують необхідну вантажопідйомність для транспортування важких матеріалів на значну висоту та великі відстані. Такі крани широко використовуються в масштабних будівельних проектах, де обійтися без них сьогодні просто неможливо. Одним з ключових параметрів, що визначають експлуатаційну гнучкість баштового крана, є його виліт – горизонтальна відстань між баштою крана і найвіддаленішою точкою, яку він може досягти своєю стрілою.

У цій магістерській кваліфікаційній роботі описано розробку механізму зміни вильоту стріли баштового крана. Запропонований механізм поєднує в собі як механічну систему, так і систему управління, що дозволяє плавно, надійно і точно регулювати виліт стріли крана, зберігаючи при цьому стабільність конструкції і несучу здатність. Зосереджуючись на ключових завданнях проектування, ця розробка являє собою значний прогрес у кранових технологіях.

Основні відмінності між звичайними та роботизованими баштовими кранами полягають в їх автоматизації, системах управління та сенсорному обладнанні. Звичайний баштовий кран значною мірою покладається на ручне управління, що вимагає постійного нагляду за переміщенням, позиціонуванням вантажу та перевіркою безпеки. На відміну від них, роботизовані баштові крани автоматизовані за допомогою передових алгоритмів, що забезпечують такі функції, як автоматичне планування маршруту, динамічний обхід перешкод і оптимізоване керування переміщенням вантажу.

Звичайні крани можуть використовувати базові датчики переважно для вимірювання ваги вантажу або простого контролю повороту. На відміну від них, роботизовані баштові крани оснащені цілим набором датчиків, включаючи: LIDAR і камери для виявлення перешкод і позиціонування. Датчики навантаження і руху, які безперервно регулюють рух в залежності від характеристик вантажу. GPS та інерційні вимірювальні модулі (IMU) для точної

локалізації та керування навіть у складних умовах. Ці датчики дозволяють роботизованим кранам вносити корективи в режимі реального часу для підтримки стабільності, оптимізації траєкторії переміщення вантажу та забезпечення безпеки.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні завдання: провести аналіз існуючих досліджень для кращого уявлення актуальності теми роботи, розробити систему оптимального керування механізмом зміни вильоту роботизованого баштового крана, опрацювати інформацію по охороні праці, виявити сильні та слабкі сторони використання розробленої системи, провести техніко-економічну оцінку та визначити доцільність впровадження такого вдосконалення механізму.

РОЗДІЛ 1

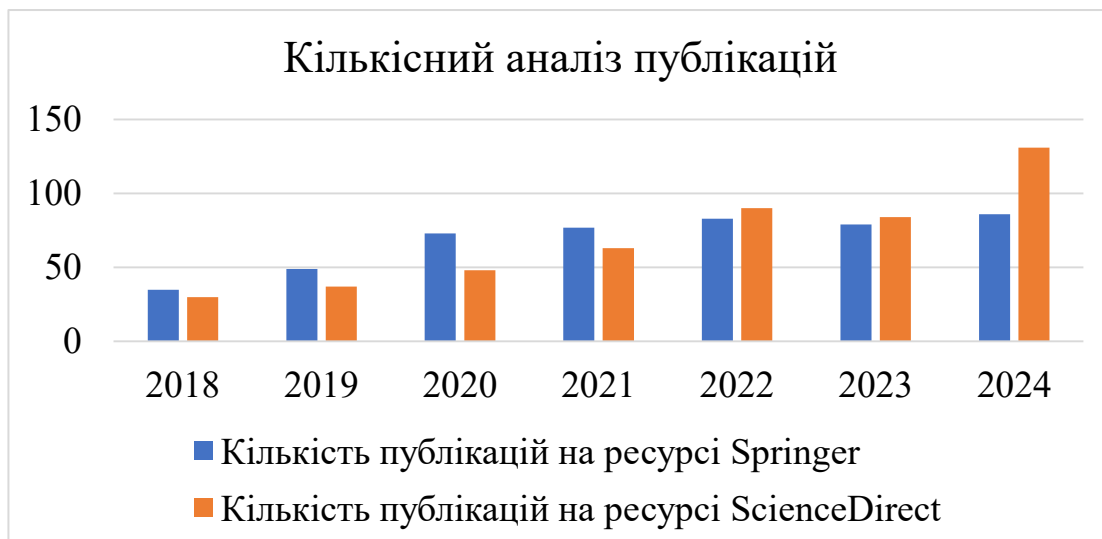
Аналіз літератури

1.1. Кількісний аналіз публікацій

Проведено кількісний аналіз трендів у наукових дослідженнях, який підтверджує високий інтерес наукової спільноти до тематики, що розглядається в даній роботі. Використовуючи платформи Springer та ScienceDirect здійснено порівняння кількості публікацій за ключовими запитами «tower crane» та «robotic tower crane» за останні 6 років. За цей період на ресурсі Springer кількість наукових публікацій, які відповідають тематиці зпиту «tower crane», зросла з 35 до 86 публікацій, що ясно дає зрозуміти про стабільне зростання інтересу до проблематики ефективної роботи та модернізації баштових кранів.

Більш суттєвий приріст можна спостерігати за запитом «robotic tower crane» на ресурсі ScienceDirect, де кількість наукових статей зросла з 30 до 131. Така динаміка свідчить про значний ріст уваги дослідників до питання автоматизації та використання робототехнічних технологій у сфері баштових кранів, зокрема, застосування інноваційних методів управління, сенсорних технологій для підвищення безпеки й продуктивності.

Актуальність даної магістерської кваліфікаційної роботи наочно ілюструється гістограмою, що наведена нижче, яка дозволяє візуально побачити зростаючий інтерес у сфері досліджень баштових кранів та перспективи їх роботизації.



1.2 Загальна інформація про баштові крани

Баштові крани [1] є ультимативними інструментами сучасного будівництва, особливо при зведенні висотних будівель. Вони представляють з себе вертикальну конструкцію з горизонтальною стрілою на вершині, що здатна піднімати й здійснювати переміщення вантажу на значну висоту. Основними складовими елементами звичайного баштового крана є власне башта, яка забезпечує необхідну висоту підйому; стріла, яка забезпечує горизонтальну складову переміщення вантажів; противага для балансування; механізми підйому, повороту та зміни вильоту. Крім того, баштові крани можуть бути стаціонарними або самопідйомними, що дозволяє використовувати їх на будівельних майданчиках різних розмірів.

Баштові крани – це поворотні крани [2] зі стрілою, яка шарнірно закріплена у верхній частині вертикально розташованої башти. Ці крани призначені для механізації будівельно-монтажних робіт при зведенні різних будівель і гідротехнічних споруд.

За конструкцією башти крани поділяються на два типи: з поворотною і нерухомою баштою. У кранів з поворотною баштою опорно-поворотний механізм знаходиться в нижній частині, а у кранів з нерухомою баштою – у верхній частині. За типом стріли крани класифікуються на моделі з підйомною стрілою та стріловидною. У подальшому ми розглянемо баштові крани зі стріловидною конструкцією (рис. 1.1). Нерухома частина такого крана має башту, яка встановлена на візках, що дозволяють йому пересуватися по підкранових коліях. Вантажний візок, підвішений на канатах, переміщується по стрілі вздовж її поздовжньої осі, змінюючи виліт вантажу під час руху.

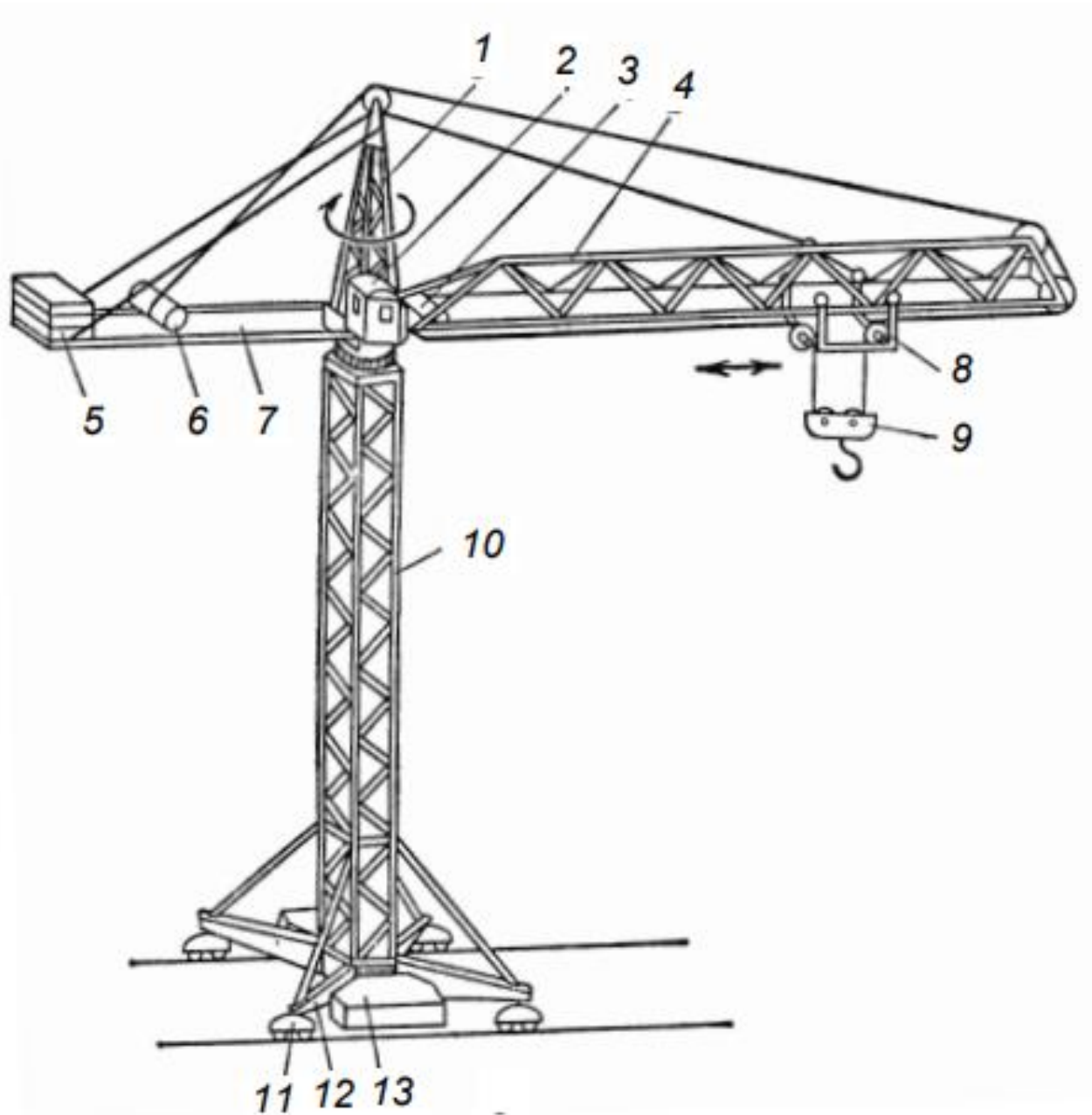


Рисунок 1.1 – Баштовий кран з неповоротною баштою та балочною стрілою: 1 – оголів'я; 2 – кабіна оператора; 3 – лебідка, що приводить в рух візок; 4 – стріла; 5 – противага; 6 – лебідка підйому вантажу; 7 – консоль противаги; 8 – вантажний візок; 9 – гакова підвіска; 10 – башта; 11 – ходовий візок; 12 – ходова рама; 13 – баласт

Основною галуззю застосування баштових кранів є будівництво багатопверхових будівель, промислових об'єктів, мостів та інших складних

споруд. Вони забезпечують ефективне і швидке транспортування будівельних матеріалів на висоту, що значно прискорює процес будівництва.

Перевагами баштових кранів є висока вантажопідйомність, можливість працювати на великій висоті, точність переміщення вантажів, гнучкість у використанні. Однак є й недоліки, серед яких високі витрати на монтаж і демонтаж, обмежена мобільність після встановлення, а також необхідність забезпечення стійкості і безпеки під час роботи, особливо у вітряну погоду.

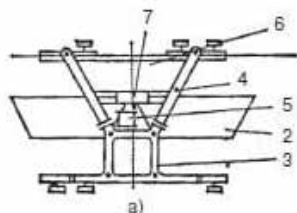
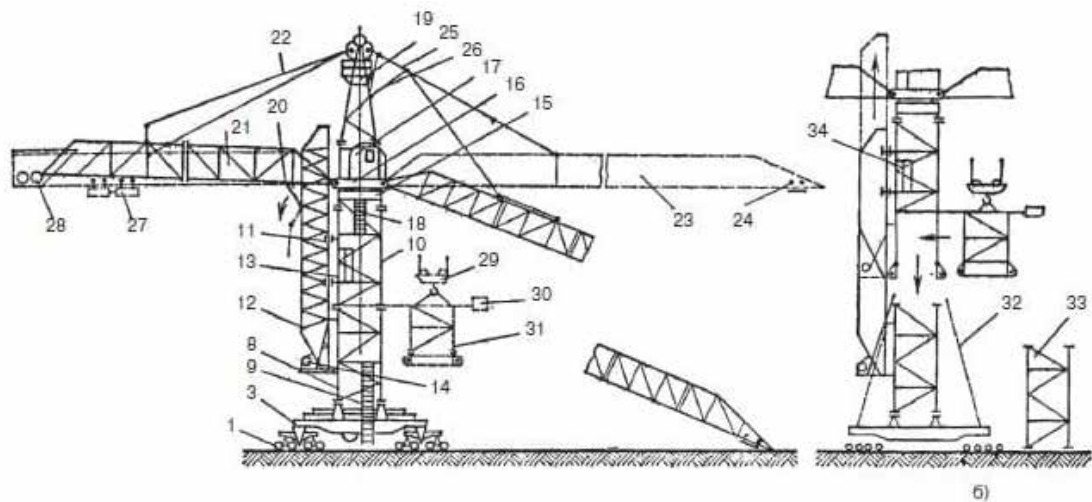
Історія [3] баштових кранів починається з давнини, коли використовувалися прості підйомні механізми. Однак сучасний тип баштового крана почав розвиватися на початку ХХ століття з індустріалізацією і потребою у швидкому та ефективному будівництві великих споруд. З розвитком технологій крани стали складнішими, зокрема з'явилися автоматизовані системи управління, що дозволило значно підвищити безпеку та ефективність їх використання.

Баштові крани були значно вдосконалені в середині ХХ століття, коли почали використовувати легкі, але міцні матеріали, такі як сталь і алюмінієві сплави. Це дозволило збільшити висоту і вантажопідйомність кранів без істотного збільшення їх ваги. Також в цей період почали активно розвиватися гідравлічні та електричні системи приводу, що зробило крани більш ефективними і зручними в експлуатації.

Історично баштові крани приводилися в дію завдяки гідравліці, але в 1970-х виробники перейшли на електрику. Типовий сьогодні баштовий кран має потужність 200 кВт. Це число також можна перевести як 208 В або 800 ампер. Електрика часто подається на кран від генераторних установок, що працюють від дизельного двигуна та генератора змінного струму. Коли на будівельному майданчику використовується баштовий кран, він зазвичай збільшує потребу в електроенергії на цьому місці на 45%.

Баштові крани зазвичай мають модульну конструкцію, що дозволяє легко збільшувати їх висоту шляхом додавання нових секцій башти. Це особливо корисно на великих будівельних майданчиках, де висоту конструкції можна

поступово збільшувати в процесі будівництва. Такі крани часто монтуються на фундамент або рейкову платформу, що забезпечує їх стійкість і можливість переміщення по будівельному майданчику.



а - первісне складання крана, б - нарощування крана;
 1 - ходові візки, 2 - пакет баластних плит, 3 - ходова рама, 4 - балка, 5 - кабельний барабан, 6 - баласт, 7 - шафа електроустаткування, 8 - підстава башти, 9, 18 - сходи, 10 - секція; 11 - балансірна балка, 12 - монтажна стійка, 13 - монтажний поліспаст, 14 - монтажна лебідка; 15, 16 - неповоротна і поворотна рами, 17 - кабіни, 19 - оголовок, 20, 32 - підкоси, 21 - протизажна консоль, 22, 25 - відтягнення, 23 - стріла, 24 - вантажний візок, 26 - монтажний укїс, 27 - візок протизаги, 28 - рама, 29 - гакова підвіска, 30 - пристосування для заведення секцій, 31 - секція з рамою шарнірів, 33 - рядова секція, 34 - кабіна підйомника.

Рисунок 1.2 – Модульна конструкція крана КБ-676

У сучасному будівництві широко використовуються різні типи баштових кранів: стаціонарні, самопідйомні, рейкові та мобільні. Кожен тип крана має свої особливості і використовується в залежності від характеру будівельних робіт і специфіки об'єкта. Наприклад, самопідйомні крани використовуються переважно для будівництва хмарочосів, оскільки вони здатні збільшувати свою висоту в міру зростання будівлі. Рейкові крани, навпаки, забезпечують пересування по будівельному майданчику, що зручно при зведенні великих промислових об'єктів або інфраструктурних споруд.

Незважаючи на свої значні переваги, баштові крани вимагають високого рівня обслуговування і постійного контролю всіх механізмів для забезпечення безпеки на будівельному майданчику. Однією з основних проблем є

необхідність дотримання жорстких вимог до стійкості крана, особливо при сильних поривах вітру або при роботі в складних погодних умовах. Крім того, монтаж і демонтаж крана – це складний процес, який вимагає спеціалізованого обладнання та досвідчених фахівців.

Останні десятиліття характеризуються безперервним розвитком технологій автоматизації баштових кранів. Це включає в себе впровадження комп'ютерних систем для точного контролю підйому і переміщення вантажів, систем безпеки, що запобігають перевантаженню, і дистанційного керування, що дозволяє оператору контролювати роботу крана на відстані. Це не тільки підвищує продуктивність, але й знижує ризик для життя працівників.

Таким чином, баштові крани є важливим елементом сучасного будівництва, який продовжує розвиватися разом з прогресом інженерних технологій, адаптуючись до нових викликів і вимог будівельної галузі.

За конструкцією стріли [4] баштові крани поділяють на баштові кран-молоти та з підйомною стрілою (luffing boom).

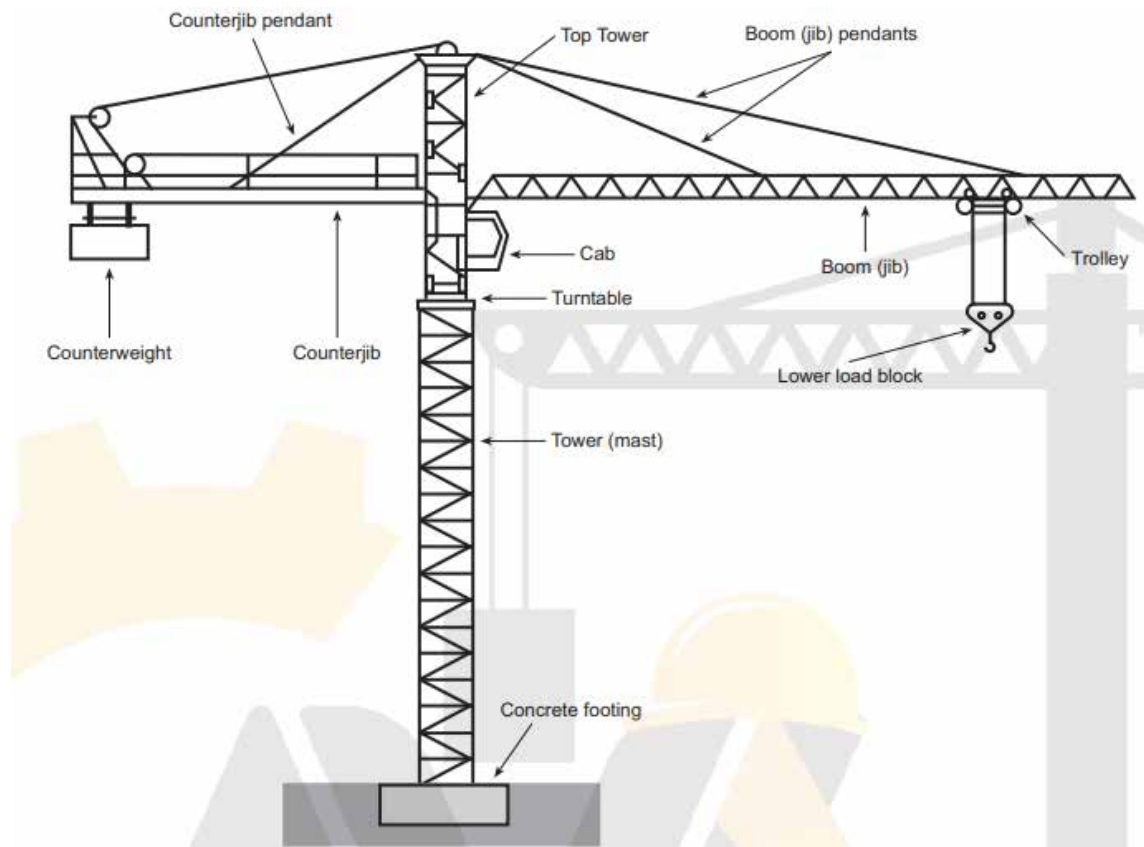


Рисунок 1.3 – Конструкція баштового кран-молота

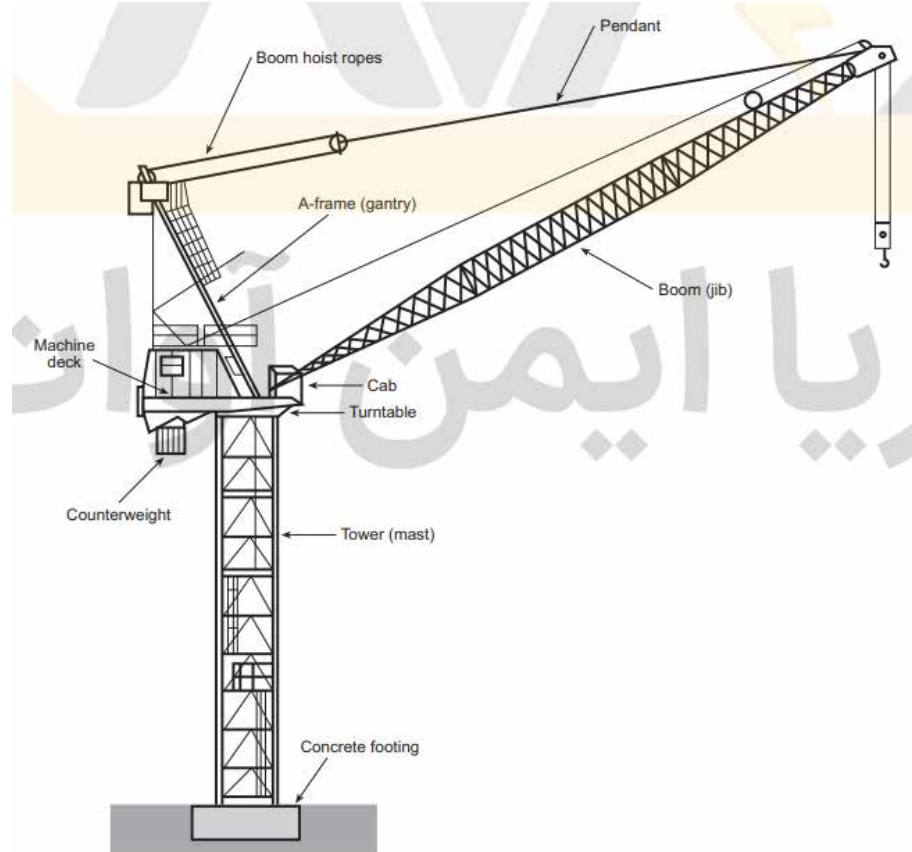


Рисунок 1.4 – Конструкція баштового крана з підйомною стрілою

Баштові крани класифікуються [5] не лише за конфігурацією башти та стріли, але й за способом монтажу. Вони бувають рейкові, стаціонарні, підйомні та мобільні (на базі вантажівки або гусеничного візка). Рейкові установки можуть бути оснащені фіксованими або поворотними баштами та будь-якою конфігурацією стріли. Завдяки своїй мобільності вони зазвичай мають більшу площу покриття, ніж підйомні та стаціонарні баштові крани. Вони також краще пристосовані до переміщення з вантажем, ніж мобільні (на вантажівках або гусеничному ході) баштові крани. Їх основна перевага - максимальне покриття при мінімальній площі майданчика. До недоліків таких установок відносяться витрати на прокладку колії і незручності, пов'язані з перериванням роботи крана, коли необхідно виконати роботи на колії або поблизу неї.

Конфігурація стаціонарної башти може бути використана з великою вигодою, оскільки вона займає таку обмежену площу. Вона може бути

встановлена на різній висоті аж до максимальної висоти окремо стоячого крана і може бути витягнута за цю межу, прив'язавши кран до споруди. Баштовий кран на статичній основі повинен мати можливість охоплювати зі свого фіксованого положення всі точки, в яких необхідно переміщувати вантажі. Вантажопідйомність крана зменшується зі збільшенням радіусу дії, тому при виборі крана слід дотримуватися обережності, щоб забезпечити можливість переміщення максимальної вантажопідйомності на потрібному радіусі. Якщо кран використовується на висоті, яку в подальшому планується збільшити, бажано, щоб башта мала можливість додавання додаткових секцій без демонтажу будь-яких вузлів стріли/контрстріли.

Баштовий кран, що піднімається, як правило, використовується з великою противагою, коли конструкція будівлі висока, бічна площа обмежена, а сама будівля здатна витримати кран. Така конфігурація крана підтримується конструкцією, для будівництва якої він використовується, і до якої він кріпиться за допомогою опорних рам і клинів. Висота крана може бути збільшена за допомогою приставних сходів, прикріплених до рам, у міру збільшення висоти конструкції. Крани, як правило, спочатку монтуються на нерухомих основах, а потім переходять на пересувні рами і драбини.

Конфігурація мобільного монтажу складається з гусеничних або вантажних одиниць, встановлених на вантажівках подібно до класу мобільних кранів. Гусеничні установки оснащені спеціальними стрілами, які встановлюються вертикально і несуть або горизонтальні, або поворотні стріли. Їх перевага полягає у великій досяжності всередину без довгого гуська, який зазвичай потрібен для того, щоб дістатися до верху споруди, якщо б використовувався мобільний кран. Баштовий кран на гусеничному ході повинен бути встановлений міцно і рівно при роботі з номінальними вантажами. Вони здатні пересуватися по твердій і рівній поверхні у встановленому стані, але мають обмежену здатність працювати з вантажами при цьому. Вони також можуть пересуватися в частково зібраному стані по непідготовленому ґрунту, якщо він знаходиться в певних межах рівня і

ущільнення. Під час роботи з вантажем мобільний баштовий кран також повинен мати висунуті виносні опори та бути надійно і рівно встановленим на домкратах. Більшість таких машин мають поворотні башти та складні відкидні стріли, які полегшують транспортування та монтаж. Деякі машини є повністю автономними і працюють від електродвигуна і можуть пересуватися по дорогах загального користування. Ці машини, як правило, здатні порівняно швидко монтувати і демонтувати, але, як правило, не можуть пересуватися в повністю змонтованому стані і не можуть працювати з вантажами під час пересування. Вибір крана або кранів для будь-якої роботи повинен здійснюватися тільки після ретельного вивчення всіх залучених факторів.

Баштові крани бувають з фіксованою (рис. 1.5) або поворотною (рис. 1.6) баштою. У баштових кранах з нерухомою баштою поворотне кільце розташоване на верхівці башти або поблизу неї, а стріла обертається навколо вертикальної осі нерухомої башти. Поворотне кільце на поворотній башті розташоване в нижній частині башти, а вся башта і стріла обертаються відносно основи крана.

Крім того, що башти можуть бути фіксованими або поворотними, вони також поділяються на монобашти, внутрішні та зовнішні башти і телескопічні башти. У монобаштових кранах стріла несеться однією баштовою конструкцією, яка може бути фіксованою або поворотною (рис. 1.7). Внутрішня і зовнішня башти характеризуються тим, що стрілу несе поворотна внутрішня башта, яка підтримується у верхній частині нерухомої зовнішньої башти. Конструкція телескопічної башти складається з двох або більше основних секцій, які вкладаються одна в одну, що дозволяє змінювати висоту крана без необхідності часткового демонтажу і повторного монтажу (рис. 1.8). Телескопічні башти, як правило, мають поворотний тип і частіше зустрічаються на рейкових і мобільних баштових кранах.

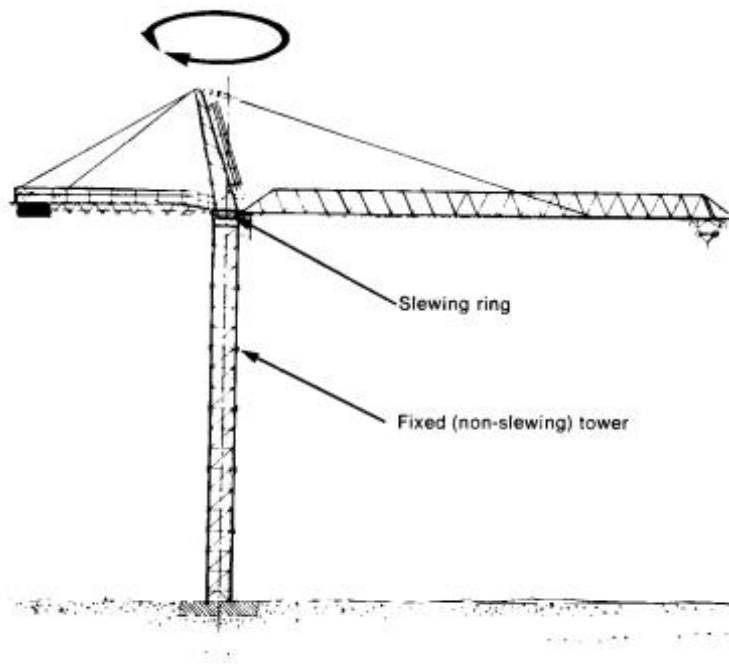


Рис 1.5 – Конфігурація баштового крану з неповоротною баштою

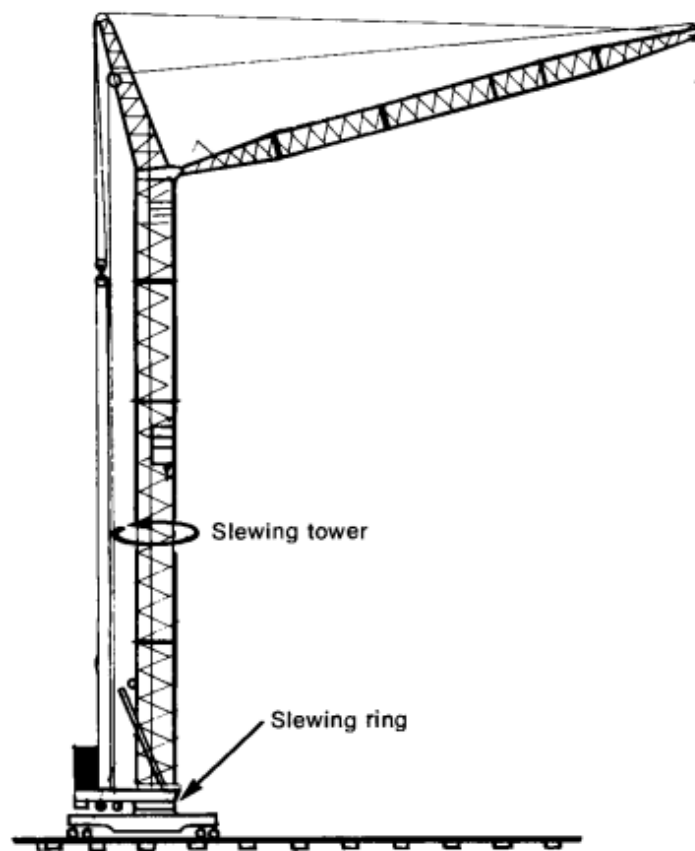


Рисунок 1.6 – Конфігурація крану з поворотною баштою

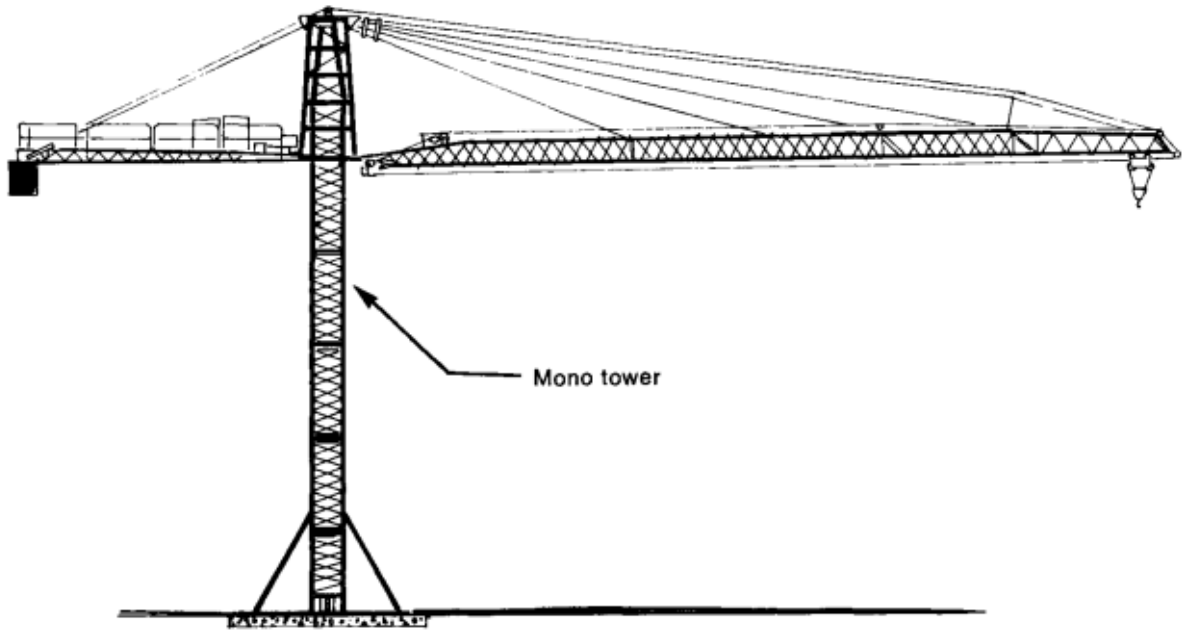


Рисунок 1.7 – Конфігурація монобашти

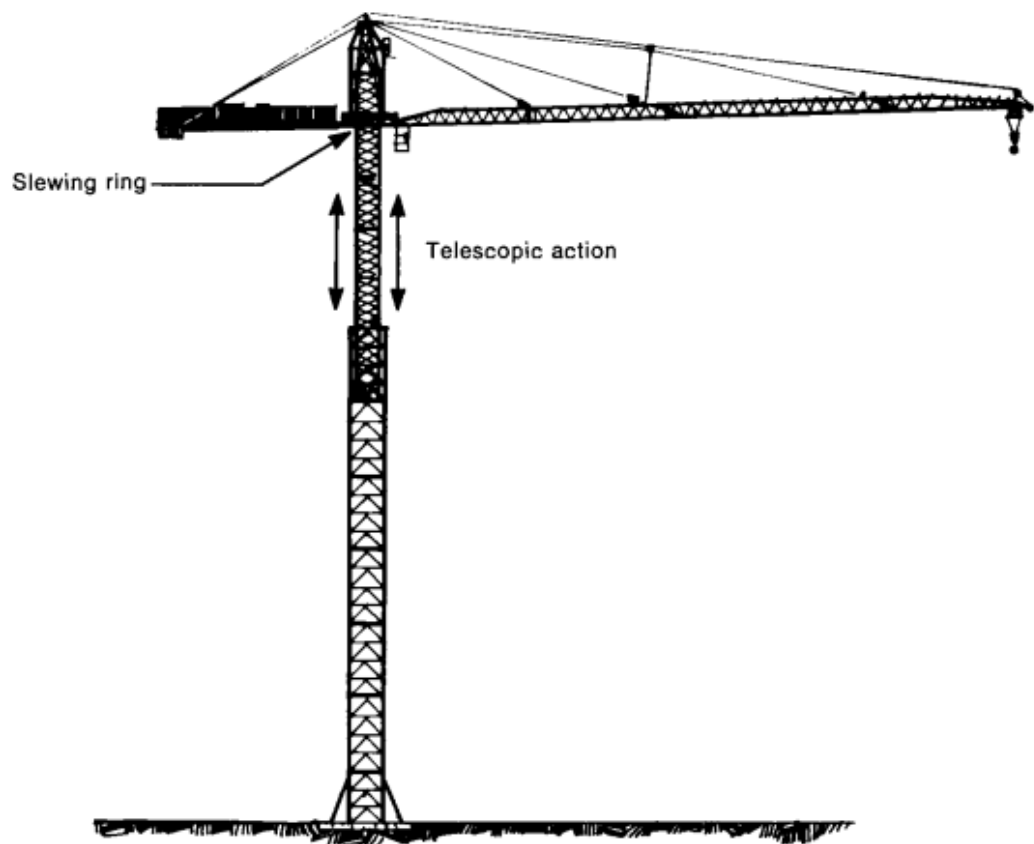


Рисунок 1.8 – Конфігурація крану з телескопічною баштою

Основними типами стріл, що використовуються на баштових кранах, є сідлові стріли, стріли з вильотом, стріли з фіксованим вильотом і стріли з вильотом, що повертаються назад. Сідельні стріли підтримуються підвісками в горизонтальному або близькому до горизонтального положенні, а вантажний гак підвішений до візка, який рухається вздовж стріли для зміни радіуса гака.

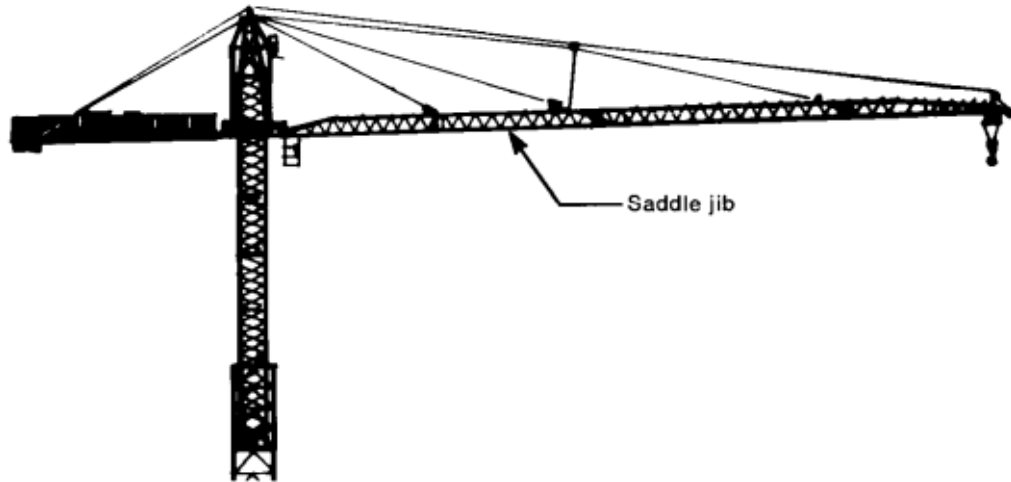


Рисунок 1.9 – Конфігурація сідельної стріли

Поворотні стріли шарнірно закріплені біля підніжжя стріли і підтримуються тросами так само, як і основна стріла на мобільному крані (рис. 1.10). Талевий канат, який підтримує вантаж, зазвичай проходить через шків у головці стріли, а радіус гака змінюється за рахунок зміни кута нахилу стріли. Стріли з фіксованим вильотом також монтуються на шарнірах біля підніжжя стріли, але, на відміну від стріл з вильотом, вони утримуються підвісками стріли під фіксованим кутом нахилу (рис. 1.11). На деяких типах гак підвішений до головки стріли, і радіус гака не може бути змінений, тоді як на інших гак підвішений до візка, який пересувається по стрілі. На стрілах із заднім поворотом шарнір стріли розташований у задній частині верхівки вежі, а гак підтримується талевим канатом, який проходить через шків на голівці стріли. (Рис. 1.12) Сідельний гусек зазвичай має менший мінімальний робочий радіус, ніж еквівалентний стріла з вильотом, і тому може працювати з вантажами, розташованими ближче до башти крана. Однак для заданої висоти башти більша висота підйому доступна при використанні стріли з вигином, і її можна

піднімати або опускати, щоб обійти перешкоди. Однією з переваг фіксованої стріли є те, що її додаткова висота в головній частині стріли дозволяє прибирати об'єкти, які б заважали сідельній стрілі. Перевагою стріли з заднім поворотом є те, що вона має менший мінімальний радіус зачеплення, ніж звичайна стріла з заднім поворотом.

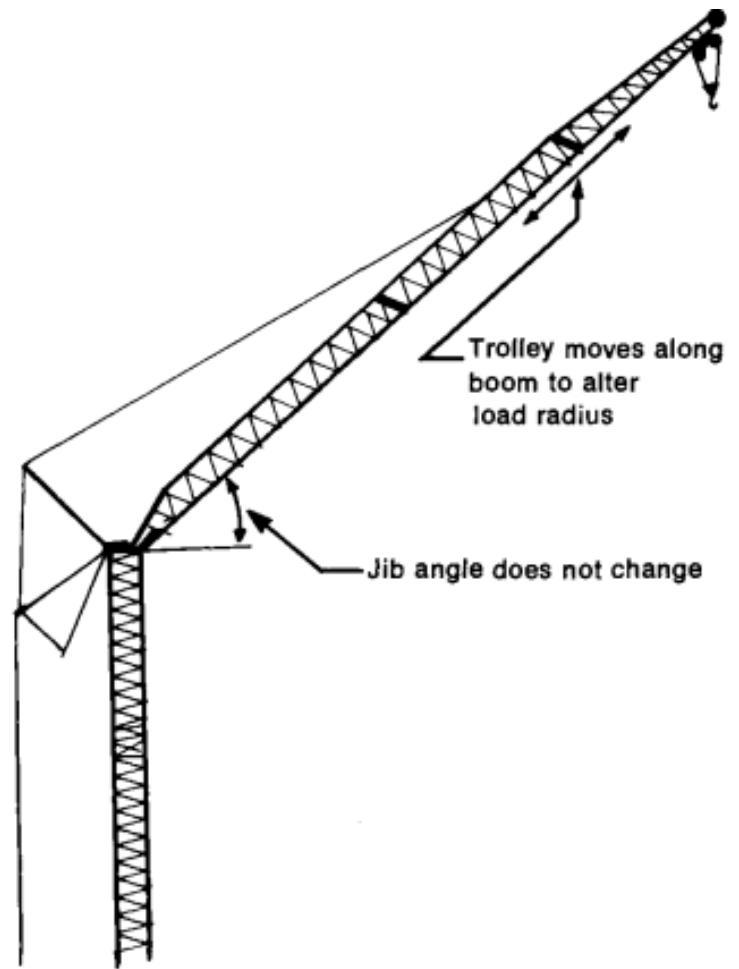
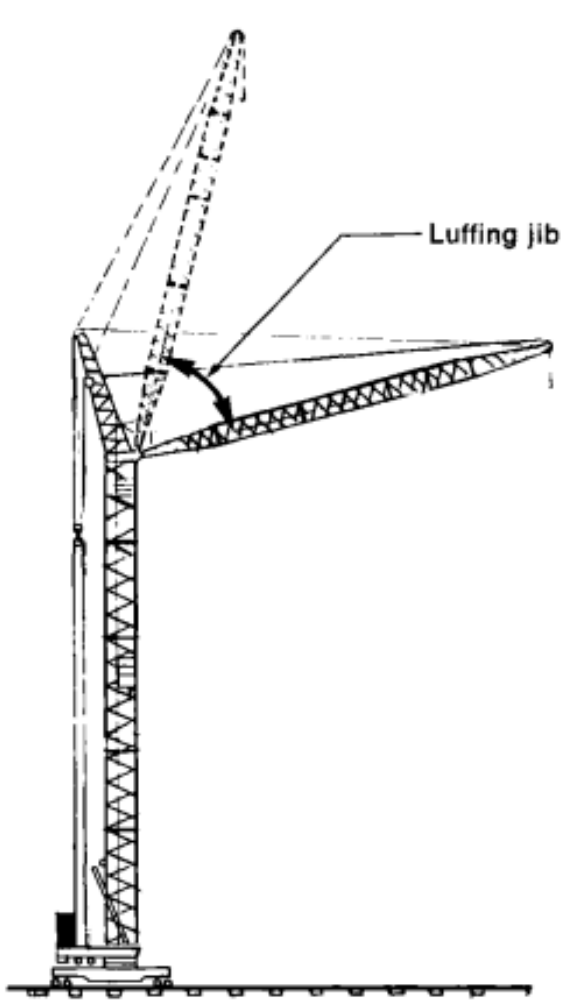


Рисунок 1.10 – Підйомна стріла баштового крану

Рисунок 1.11 – Конфігурація із закріпленою стрілою

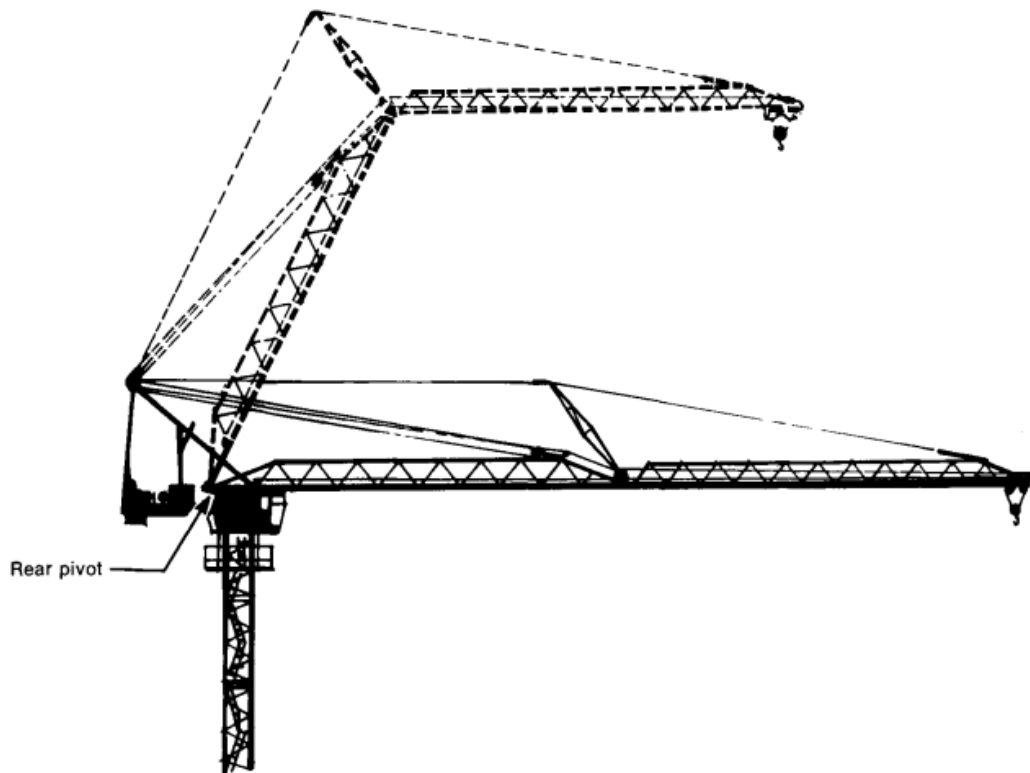


Рисунок 1.13 – Конфігурація стріли з заднім поворотом

1.3 Вимоги до елементів баштових кранів

Коробки передач повинні бути сконструйовані таким чином, щоб шестерні автоматично змащувалися. Шестерні також повинні бути легко знімними, а коробки – герметичними. Вони повинні бути жорстко сконструйовані і оснащені оглядовими кришками і підйомними гачками, де це необхідно. Повинні бути передбачені засоби для дозаправки мастила, достатньої вентиляції, дренажу та засоби для перевірки рівня мастила. Корпуси повинні бути оброблені, посаджені і правильно розташовані на оброблених поверхнях, за винятком випадків, коли шестерні змонтовані на валах, а редуктори є невід'ємною частиною передачі. В останньому випадку необхідно забезпечити правильне вирівнювання валів.

На важелях перемикачів передач з ручним приводом необхідно передбачити можливість їх надійної фіксації в потрібному положенні. Необхідно також передбачити заходи для запобігання вивільненню підйомного блоку під час перемикачів передач, а інструкція з експлуатації повинна

попереджати оператора про необхідність заблокувати або опустити блок на землю перед тим, як намагатися переключити передачу.

Кожне гальмо на крані має бути відмовостійким, тобто автоматично спрацьовувати в разі втрати живлення (пневматичного, гідравлічного або електричного). Ці гальма не повинні відпускатися до відновлення електроживлення, і тільки тоді, коли їх навмисно відпускають. Гальмо повинно безпосередньо впливати на підйомний барабан, тому між гальмом і барабаном не повинно бути ременів або ланцюгів. Зупиняючий момент гальма повинен щонайменше на 25% перевищувати максимальний момент, що прикладається до барабана в умовах експлуатації, без урахування впливу тертя. -Якщо використовуються електромеханічні гальма, вони повинні бути сконструйовані таким чином, щоб гальмівний момент виникав одразу після припинення подачі струму. Необхідно вжити заходів, щоб запобігти живленню гальмівного магніту вторинним струмом при припиненні подачі основного струму. Гальма не можна відпускати доти, доки привід не буде під напругою і не зможе передавати крутний момент на барабан. Усі вантажні гальма та муфти повинні мати достатній розмір і теплову потужність, щоб контролювати всі номінальні навантаження підйомника з мінімальним рекомендованим натягом.

Пружини, що приводять гальма в дію, повинні бути стиснутими і не повинні бути напружені більше, ніж на 50% від межі пружності на кручення матеріалу. Напруження в будь-якій частині гальмівної конструкції (крім пружин) не повинно перевищувати 50% допустимого напруження для матеріалу під час дії гальмівного моменту. Робочі поверхні всіх гальмівних барабанів повинні бути механічно обробленими, гладкими та без дефектів. Гальмівні вантажі повинні бути надійно закріплені на важелях.

Гальмівні колодки та накладки повинні бути захищені від дощу, мастила та оливи. Всі гальма повинні бути забезпечені простими і легкодоступними пристроями для компенсації зносу накладок, за винятком випадків, коли регулювання відбувається автоматично і не вимагається протягом терміну служби накладок. -Гальмо на приводі повороту повинне бути здатне запобігати

зміщенню стріли крана під дією вітрового тиску до максимального робочого вітрового тиску, зазначеного виробником. Гальмо має бути сконструйоване таким чином, щоб стріла крана поверталася за вітром, якщо його швидкість перевищує 60 км/год (40 миль/год). На рейкових кранах кожен привід візка повинен бути обладнаний гідравлічним або магнітним гальмом достатнього розміру, щоб зупинити кран на відстані в футах або метрах, еквівалентній 10% швидкості руху крана в футах або метрах за хвилину. Також повинні бути передбачені заходи для запобігання переміщенню крана під час сильного вітру.

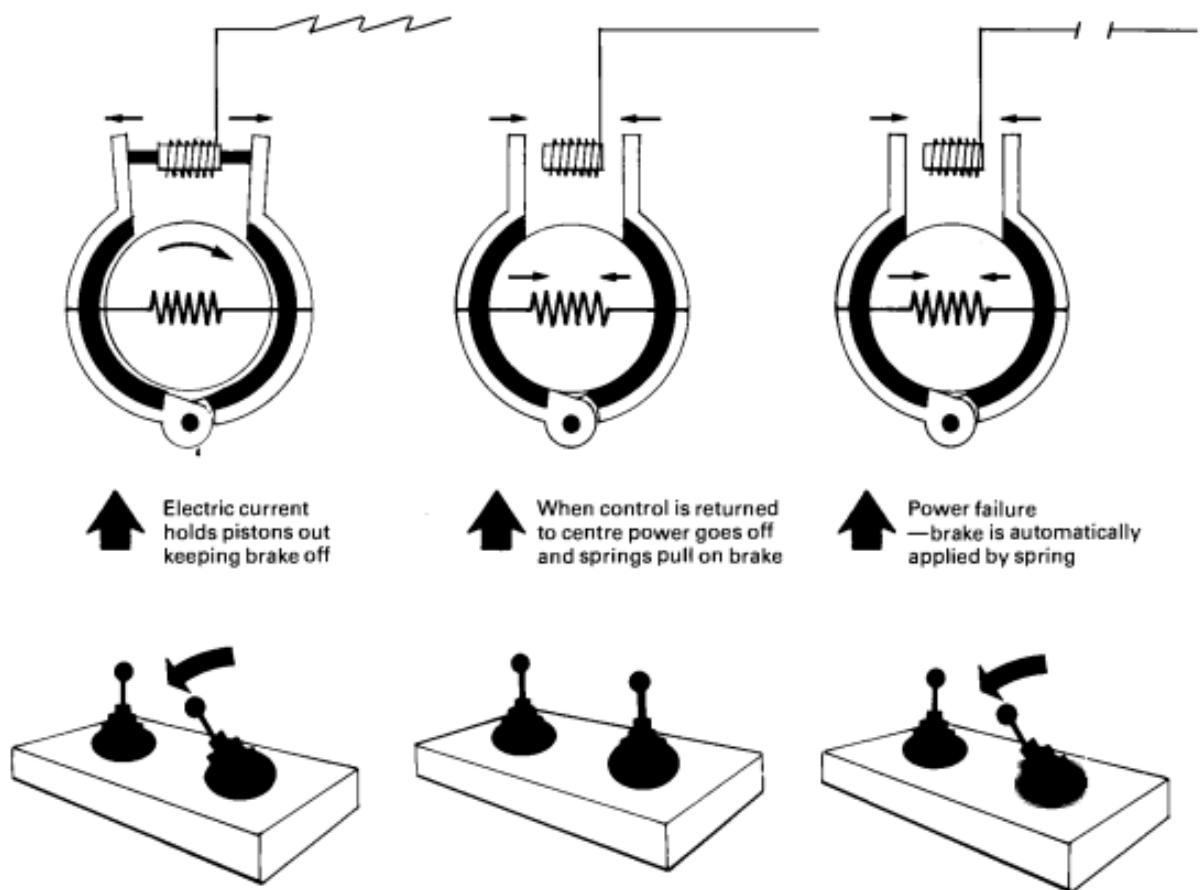


Рисунок 1.14 – Типова безвідмовна робота (нормально-зімкнені гальма)

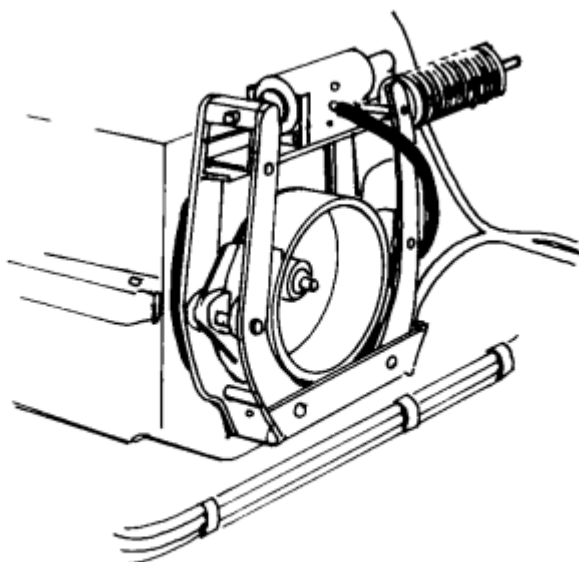


Рисунок 1.15 – Між гальмом і барабаном не повинно бути ременів або ланцюгів

Баштові крани з поворотною стрілою, як і мобільні крани, потребують обмежувачів стріли, які ефективно запобігають перекиданню стріли або її відкиданню назад по башті. (Рис. 1.15) Найкращим типом обмежувача стріли є той, що поєднує в собі функції відключення двигуна вишки та фізичної зупинки стріли, коли вона досягає заданого максимального кута. Цей тип обмежувача зазвичай має вигляд пружини або пневматичного поршня, що працює в закритому циліндрі, встановленому на оголовку щогли, і перехоплює стрілу якомога вище над шарнірами стріли. Коли стріла досягає заданого високого кута, спрацьовує вимикач, який призводить до зупинки бурового барабана. Деякі пристрої, що використовують принцип кінцевих вимикачів, які відключають двигун бурової установки, коли стріла досягає заданого кута, доступні, але не рекомендуються для використання, оскільки вони не зупиняють відкидання стріли назад під дією стрілового батога або сильного вітру. Вони неефективні для запобігання поширеним аваріям зі стрілою. Однак ці пристрої рекомендується використовувати в поєднанні з пристроями для зупинки стріли.

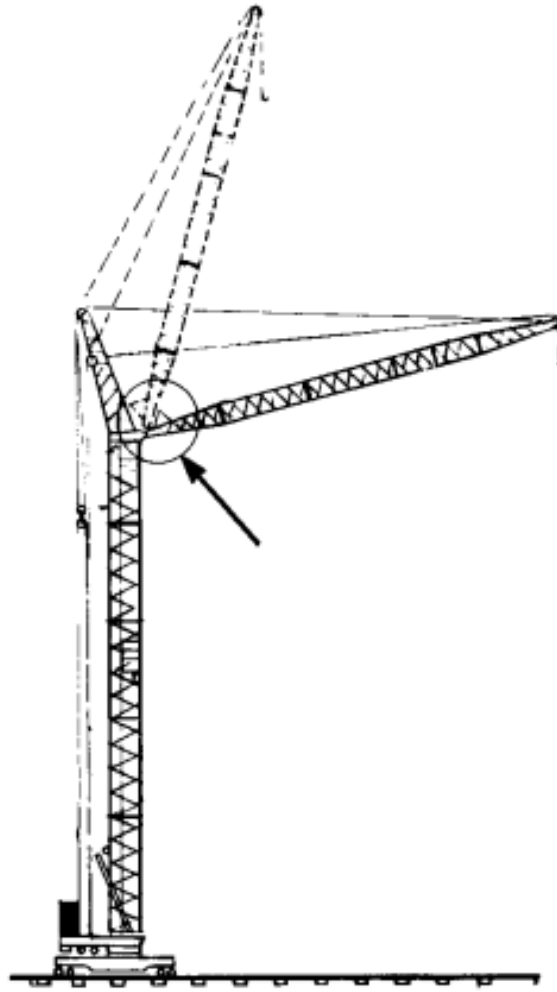


Рисунок 1.16 – На всіх стрілових кранах, що піднімаються, повинні бути встановлені обмежувачі стріли

1.4 Аналіз механізмів зміни вильоту баштових кранів

Візок – це механізм [6], який рухається вздовж стріли і переміщує вантаж. Він приводиться в дію електродвигуном і управляється з кабіни оператора. Візок складається з платформи, яка утримує вантаж, і системи шківів і канатів, які дозволяють піднімати і опускати вантаж. Крім того, візок також контролює положення вантажу вздовж стріли, що дозволяє підвищити гнучкість при транспортуванні будівельних матеріалів по будівельному майданчику.

В представленій статті [7] автори В.С. Ловейкін, Ю.О. Ромасевич, Л.С. Шимко, К.І. Почка описують проблеми розробки динамічної моделі спільного руху механізмів, що враховує головний рух приводних механізмів і коливальний

рух вантажу на гнучкому підвісі та ланок механізмів з пружними властивостями. На основі динамічної моделі ними побудовано математичну модель руху механізмів. Для обраної стрілової системи баштового крана виконано динамічні розрахунки. За результатами розрахунків проведено динамічний аналіз спільного руху візка та механізму підйому. За результатами аналізу виявлено значні динамічні та енергетичні перевантаження механізмів під час перехідних процесів таких як пуск та гальмування, а також наявність високочастотних коливань у ланках з пружними властивостями і низькочастотних коливань вантажу на гнучкому підвісі. У розрахунках використовується тривимірна динамічна модель стріли баштового крана, зображена на рисунку 1.17.

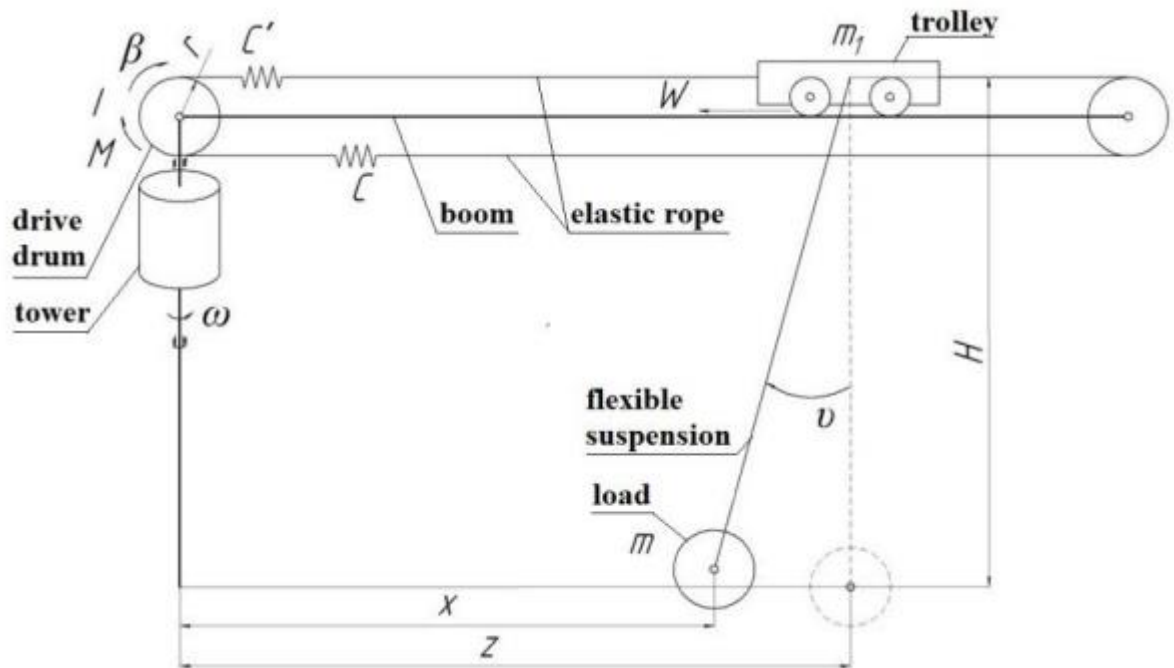


Рисунок 1.17 – Динамічна модель механізму переміщення візка при сталому повороті крана

В іншій статті [8] авторів Michał Michna, Filip Kutt, Łukasz Sienkiewicz та ін. описується апаратне забезпечення на механічному рівні та моделювання у випробуваннях прототипів приводів баштових кранів.

У цій статті запропоновано та описано методику статичного та динамічного моделювання, а також лабораторних випробувань на механічному

рівні Hardware-In-the-Loop (МНІЛ) прототипів приводних систем з енергозберігаючими електродвигунами з постійними магнітами, призначеними для використання в сучасних будівельних кранах. Ці дослідження були спрямовані на проектування та будівництво нового типу баштового крана компанії «Krupiński Cranes Company». Описаний етап досліджень був необхідний для обґрунтування вибору елементів приводної системи та підтвердження її відповідності чинним стандартам. Механічна конструкція крана на момент проведення випробувань не була завершена. Перевірку параметрів приводної системи необхідно було виконати в лабораторних випробуваннях МНІЛ, в яких можна було б імітувати крутний момент, що діє на вал електродвигуна. Було показано, що моделювання МНІЛ для крана може бути точним і ефективним підходом на етапі розробки. Проведено експериментальні випробування вибраних робочих циклів прототипів кранових приводів. Експериментальні дослідження проводилися в лабораторії LINTE² Гданського політехнічного університету (Польща), де був розроблений симулятор МНІЛ. Найважливішим компонентом системи був динамометр та система керування ним. Було розроблено спеціалізоване програмне забезпечення для керування динамометром та емуляції навантаження, що припадає на кран. Проведено серію випробувань, пов'язаних з параметрами навколишнього середовища електродвигуна.

Привід талі складається з головної лебідки (електродвигун, гальмо, редуктор і канатний барабан), а також каната, візка, гакового блоку, канатних коліс і точки кріплення каната (вертлюг). Канат кріпиться до барабана талі (а), проходячи через чавунні (б) і поліамідні (в) колеса на поворотному столі. Потім канат перекидається через канатні колеса в блоці гака і візок (d). Кінець каната кріпиться до останнього сегмента стріли (e). Система приводу підйому оснащена електромагнітним барабанним гальмом для утримання вантажу при зупинці, а також для збереження енергії під час роботи на підвищеній швидкості.

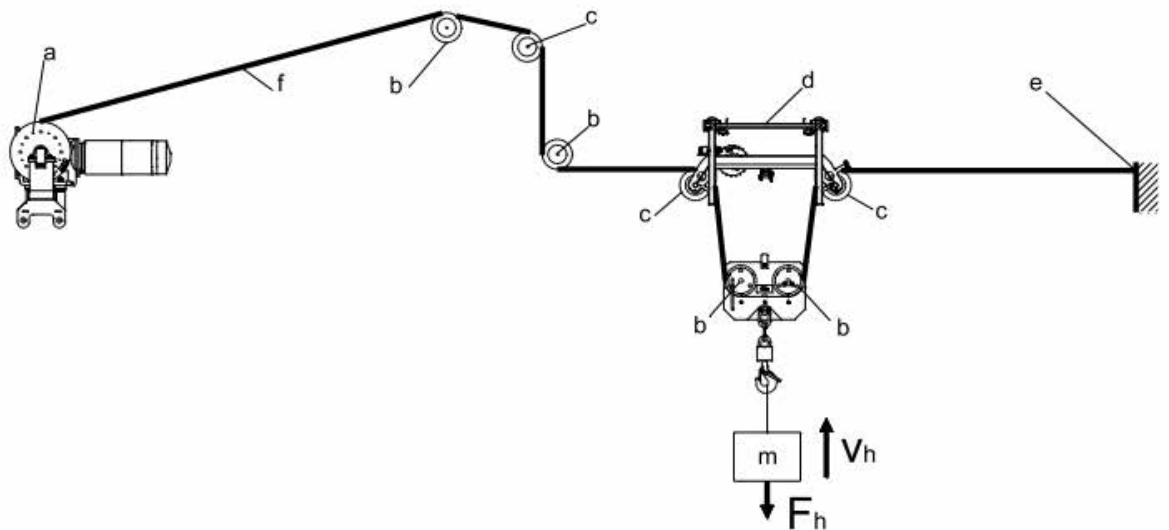


Рисунок 1.18 – Схема головного талевого каната: (а) барабан талі, чавунні (б) і поліамідні (в) колеса на поворотному столі, (г) візок, (д) точка кріплення каната (вертлюг), (е) канат

В наступній [9] статті описується прогнозування динамічних реакцій баштового крана при сильному прибережному вітрі на основі машинного навчання. Зі стрімким розвитком будівельної галузі баштові крани все частіше використовуються у прибережному будівництві. Однак через складність умов експлуатації баштові крани вразливі до тайфунів, гроз та інших екстремальних природних катаклізмів. Тому стає все більш важливим здійснювати попередження про безпеку конструкції баштового крана під дією сильного вітру. В даній роботі побудовано систему моніторингу реакції баштових кранів в режимі реального часу на основі Інтернету речей (IoT), яка реалізує довгостроковий моніторинг всього процесу роботи баштового крану. На основі даних довгострокового моніторингу та алгоритму машинного навчання було створено дві моделі прогнозування реакції баштових кранів. Під час проходження супертайфуну In-fa було заздалегідь спрогнозовано максимальне зміщення конструкції башти на основі виміряних даних про швидкість вітру на майданчику, що добре узгоджується з даними про зміщення, відстежуваними за допомогою Інтернету речей. Результати показують, що при сильному вітрі непрацююча вежа має запізнення реакції, в результаті чого її максимальне

зміщення не відповідає моменту максимальної швидкості вітру на майданчику. Це в основному пов'язано з ефектом флюгера вежі в неробочому стані. Запропонована в цій статті модель прогнозування може забезпечити своєчасне та ефективне попередження про небезпеку для конструкції вежі. Вона також може надати корисні інженерні рекомендації та наукові пропозиції щодо попередження про безпеку конструкції для того ж типу баштових кранів, на яких не встановлені системи моніторингу IoT.

В публікації [10] авторів Muhammad Zeshan Akber, Wai-Kit Chan, Hiu-Hung Lee та Ghazanfar Ali Anwar пропонується TPE-оптимізований DNN (Tree-Structured Parzen Estimator, deep neural network) з механізмом уваги для прогнозування умов переміщення корисного вантажу баштового крана. Точне прогнозування переміщення корисного вантажу та забезпечення ефективного контролю під час динамічних операцій баштових кранів мають вирішальне значення для безпеки крана, включаючи здатність прогнозувати масу корисного вантажу в межах безпечного або нормального діапазону. У цьому дослідженні використовується глибоке навчання для точного прогнозування нормального та аномального переміщення корисного вантажу баштових кранів. Зменшений прототип баштового крана з систематичною системою збору даних побудований для проведення експериментів і збору даних. Зібрано дані, пов'язані з 12 тестовими сценаріями, кожен з яких представляє певну комбінацію руху підйому і повороту, а також співвідношення маси корисного вантажу до противаги, що визначає експлуатаційні варіації баштового крана. Ці комплексні дані досліджуються за допомогою нової глибокої нейронної мережі, що базується на увазі, з оптимізацією деревоподібного оцінювача Parzen Estimator (TPE-AttDNN). Запропонована TPE-AttDNN досягла точності прогнозування 0.95 з частотою помилкових спрацьовувань 0.08. Ці результати наочно демонструють ефективність запропонованої моделі в точному прогнозуванні стану переміщення корисного вантажу баштового крана.

Khalid L. Sorensen [11] змодельовав систему як візок з сингулярним маятником і ввів нелінійність щоб вирішити задачу покращення системи

переміщення візка. За різних умов навантаження крани можуть мати широкий діапазон варіацій параметрів моделі. В даній публікації описується розробка надійної стратегії керування для досягнення високої точності позиціонування, короткого часу транспортування та придушення кута повороту для невизначеної системи крана. Кран змодельовано як систему з трьома ступенями свободи, а задачу керування досліджено для двох випадків: системи з одним входом керування (сила на візку) та системи з двома входами керування (сила на візку та крутний момент на підйомнику). Розроблено системи регулятора та спостерігача. Для досягнення цілей стеження розроблено оптимальний робастний регулятор на основі синтезу з ДК-ітераційним алгоритмом. Ідеальне позиціонування і придушення кута повороту досягається за коротший час, коли застосовуються обидва входи керування. Крім того, в цьому випадку менша кількість керуючих впливів призводить до менших коливань, порівняно з випадком, коли на візок прикладається лише сила. На рисунку 1.19. представлено схематичне зображення механізму переміщення візка з подвійним маятником.

В статті [12] описується новий адаптивний контролер з багатоваріантними обмеженнями на стан для баштових кранів 5-DOF зі змінною довжиною кабелю. Щоб задовольнити вимоги безпеки та транспортування, важливо переконатися, що всі обмеження стану, які приводяться в дію, задовольняються як теоретично, так і практично. З цією метою, деякі допоміжні умови були ретельно розроблені, щоб обмежити всі керовані змінні стану в межах відповідних діапазонів. Враховуючи параметричні невизначеності, запропоновано адаптивний регулятор для оцінки невизначених/невідомих параметрів, пов'язаних з тертям, а також для компенсації тертя. Зокрема, введено складний адаптивний закон для точної оцінки невідомої маси корисного вантажу за допомогою онлайн ідентифікації. Наскільки нам відомо, ця стаття має стати першим замкнутим контролером для баштових кранів 5-DOF (degrees of freedom), в якому всі керовані змінні стану обмежені в заданих межах. Для теоретичного доведення стійкості системи використано метод

Ляпунова та теорему Ласаля про інваріантність. Апаратні експерименти продемонстрували задовільну якість керування та значну робастність запропонованого регулятора.

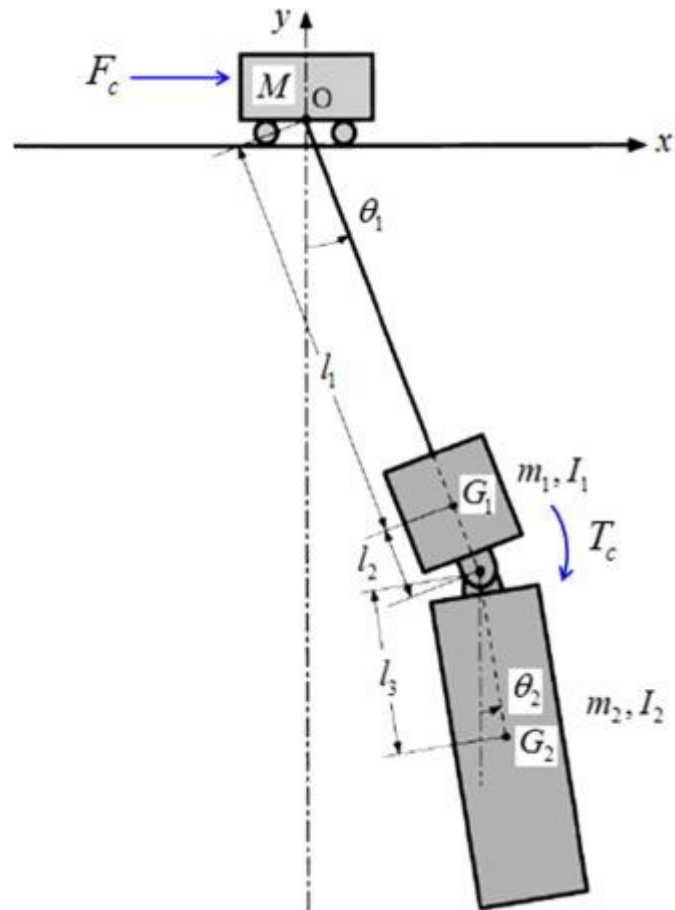


Рисунок 1.19 – Моделювання системи кран-підйомник як подвійного маятника

РОЗДІЛ 2

Розробка оптимального керування механізмом зміни вильоту роботизованого баштового крану

2.1. Постановка задачі оптимального керування

Даний розділ присвячено синтезу оптимальної системи керування механізмом зміни вильоту роботизованого баштового крану шляхом налаштування LQR регулятора. Для його розробки необхідно представити динамічну модель, скласти для неї рівняння руху та розробити матричну модель, з якою буде зручно працювати в ході проведення експериментів.

Значна кількість вантажопідійомних машин представляють як двомасові динамічні моделі. Таке представлення потрібне щоб мати можливість провести динамічний аналіз руху таких машин, що вже дає змогу оцінити величину та характер зміни динамічних навантажень у їх ланках. Це, у свою чергу, дозволяє розрахувати елементи машини чи механізму за діючими навантаженнями.

На рисунку 2.1 представлено графічне зображення динамічної моделі механізму зміни вильоту баштового крану з вантажем на гнучкому підвісі.

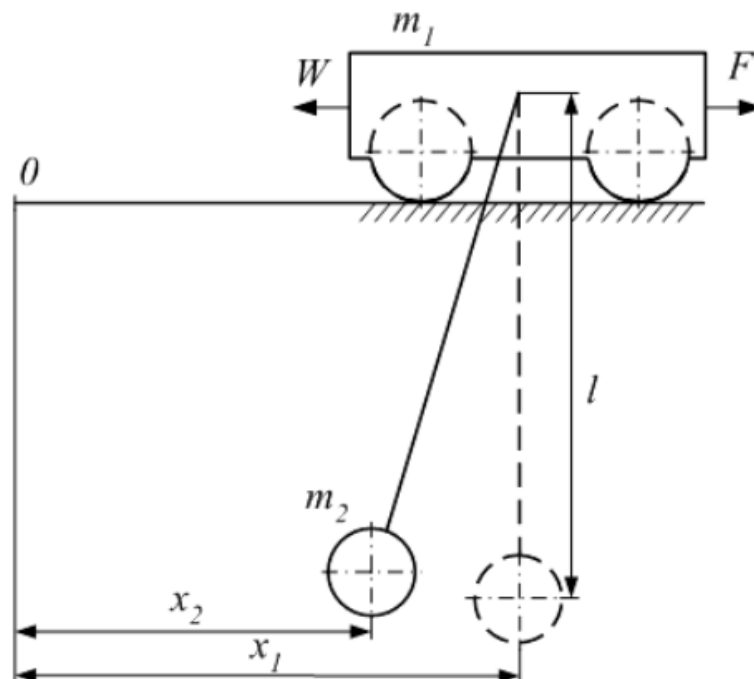


Рисунок 2.1 – Двомасова динамічна модель руху крану із вантажем на гнучкому підвісі

Ця динамічна модель візка крана описується [13] наступною системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 + \frac{m_2}{m_1} \cdot \ddot{x}_2 = \frac{F_1}{m_1} \\ x_1 = x_2 + \Omega^{-2} * \ddot{x}_2 \\ \dot{F}_1 = F_2 \\ \dot{F}_2 = F_3 \end{cases} \#(2.1)$$

де m_1 – маса візка механізму зміни вильоту; m_2 – маса вантажу із захватним пристроєм; x_1, x_2 – координати центрів мас відповідно візка та вантажу; Ω – власна частота коливань вантажу відносно нерухомої точки підвісу ($\Omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$); g – прискорення вільного падіння; l – довжина гнучкого підвісу вантажу; F – сумарне тягове або гальмівне зусилля, що діє на механізм.

В середовищі Wolfram Mathematica було синтезовано математичну модель механізму переміщення візка роботизованого баштового крану та записано її в матричній формі. При чому, особливістю розробленої моделі є збільшення її порядку до шостого, що в подальшому дасть змогу більш гнучко впливати на систему за рахунок керування прискоренням рушійних сил.

$$\left(\begin{array}{cccccc|ccc} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\Omega^2 m_2}{m_1} & \frac{\Omega^2 m_2}{m_1} & 0 & 0 & \frac{1}{m_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \Omega^2 & -\Omega^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right) \quad (2.2)$$

В цьому записі

$$\Omega = \sqrt{\frac{g}{l}}, \#(2.3)$$

Вищезгадана матриця математичної моделі складається з таких матриць:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{\Omega^2 m_2}{m_1} & \frac{\Omega^2 m_2}{m_1} & 0 & 0 & \frac{1}{m_1} & 0 \\ \Omega^2 & -\Omega^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \#(2.5)$$

$$C = [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \#(2.6)$$

В інженерії управління та ідентифікації систем представлення простору станів – це математична модель фізичної системи, яка задається набором входів, виходів і змінних, пов'язаних між собою диференціальними рівняннями першого порядку або різницевиими рівняннями. Такі змінні, які називаються змінними стану, змінюються в часі в залежності від значень, які вони мають у кожний момент часу, і від значень вхідних змінних, що задаються ззовні. Значення вихідних змінних залежать від значень змінних стану, а також можуть залежати від значень вхідних змінних.

Простір стану або фазовий простір – це геометричний простір, в якому осями є змінні стану. Стан системи може бути представлений у вигляді вектору, вектору стану.

Важливо зазначити, що всі подальші розрахунки будуть проводитись для чотирьох випадків роботи механізму зміни вильоту. А саме:

- 1) При вильоті 12м та навантаженні 20т
- 2) При вильоті 12м та навантаженні 200кг
- 3) При вильоті 2м та навантаженні 20т
- 4) При вильоті 2м та навантаженні 200кг

Для реалізації оптимального керування механізмом було вирішено використати лінійно-квадратичний регулятор (LQR), який повинен задовольнити наші вимоги.

Теорія оптимального керування займається управлінням динамічною системою з мінімальними витратами. Випадок, коли динаміка системи описується набором лінійних диференціальних рівнянь, а вартість описується квадратичною функцією, називається LQ-задачею. Одним з основних результатів теорії є те, що рішення забезпечується лінійно-квадратичним регулятором (LQR) – регулятором зі зворотним зв'язком, рівняння якого наведені нижче.

LQR-регулятори[14] мають притаманну їм стійкість з гарантованим коефіцієнтом підсилення і фазовим запасом, і вони також є частиною розв'язку LQG (лінійно-квадратично-гауссової) задачі.

Об'єкт керування в згаданому регуляторі задається у відповідності до виразу нижче:

$$\dot{X} = AX + Bu, \#(2.7)$$

де A та B – матриці, які залежать від параметрів динамічної системи.

Початкові умови задаються наступним чином:

$$X(0) = X_0 \#(2.8)$$

Критерій якості регулювання записується так:

$$J = \int_0^{\infty} (X^T Q X + u^T R u) dt \rightarrow \min, \#(2.9)$$

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

Також обмеження у нашій задачі ВІДСУТНІ.

Матриці Q та R повинні бути додатновизначеними ($Q > 0$ 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 $N \times N$.

$$\begin{bmatrix} \delta Position & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \delta Position & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \delta Velocity & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \delta Velocity & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \delta F1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \delta F2 \end{bmatrix} \#(2.10)$$

У виразі (2.8) показано матрицю Q вагових коефіцієнтів, де $\delta Position$ – вагові коефіцієнти, які показують важливість мінімізації критерію положення, $\delta Velocity$ – ваговий критерій, що відповідає за важливість швидкості, $\delta F1$ та $\delta F2$ – вагові коефіцієнти, що мають вплив на рушійні сили

В цілому, розв'язання задачі створення LQR регулятора відбувається в такі етапи:

1. Задання матриць A і B (математичну модель динамічної системи)
2. Задання початкових умов руху (від них не залежатиме керування, однак вони впливають на величину критерію J)
3. Задання матриць Q та R
4. Розв'язок рівняння Ріккати

5. Розрахунок вектора K

2.2. Розв'язання задачі оптимального керування

Регулятор, який буде забезпечувати мінімум критерію J , будемо шукати у вигляді наступного виразу:

$$u = KX = \sum_{i=1}^N k_i x_i = k_1 x_1 + k_2 x_2 + \dots + k_N x_N, \#(2.11)$$

де $x_1, x_2 \dots x_N$ – змінні стану динамічної системи;

X – вектор змінних стану системи;

N – розмірність вектору стану системи (порядок системи);

K – вектор-стрічка, компонентами якого є коефіцієнтами $k_1, k_2 \dots k_N$ і який необхідно визначити у ході розв'язання задачі.

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

$$A^T P + P A + Q - P B R^{-1} B^T P = 0, \#(2.12)$$

де P – матриця-розв'язок рівняння Ріккаті. Шуканий LQR-регулятор отримаємо за формулою:

$$K = -R^{-1} B^T P \#(2.13)$$

В середовищі Wolfram Mathematica, для вищеприписаної математичної моделі було синтезовано LQR регулятор, мета якого створити керуючих вплив на систему, відповідно до наступних вимог: мінімізація часу виходу на

номінальну швидкість руху, яка складає 0.5м/с, при цьому перерегулювання повинне бути мінімальним, а піки потужності повинні бути якомога меншими.

Для досягнення заданих вимог до системи керування необхідно підібрати відповідні значення вагових коефіцієнтів інтегрального критерію оптимізації біля фазових змінних та біля керування. Підбір значень ваг мною виконувався в ручному порядку таким чином, щоб якомога ближче дістатися до бажаних параметрів.

Оскільки відомо, як кожен з вагових коефіцієнтів впливає на результати на виході, можна досить гнучко налаштувати LQ регулятор. Якщо говорити конкретніше, то:

1. δR (вага керуючого впливу) – цей параметр визначає, наскільки агресивно або обережно регулятор буде змінювати керуючі дії для досягнення цільової швидкості. Якщо δR має високе значення, регулятор стає менш агресивним і буде робити плавніші корекції швидкості, що зменшує різкі зміни керуючих сигналів. Це, в свою чергу, призводить до більш плавного набору швидкості. Збільшення значення δR призводить до більшої плавності зміни швидкості, а зменшення значення цього параметру призводить до швидкої зміни з можливими ривками.

2. $\delta F1$ і $\delta F2$ – Ваги інтеграції помилок – ці ваги визначають вплив інтегральних компонент на точність досягнення цілей у станах системи. Збільшення цих ваг призводить до більш строгого контролю відхилень від бажаних траєкторій або цілей, можуть зменшити довготривалі відхилення, але при цьому можуть збільшити осциляції.

3. $\delta Position$ – Вага положення (позиції) – визначає важливість точного слідування за позицією системи. Збільшення цієї ваги посилює контроль регулятора за позицією, що може уповільнити систему або додати коливаний швидкості для досягнення заданого положення.

4. $\delta Velocity$ – вага швидкості – визначає важливість досягнення і підтримання заданої швидкості. При збільшенні значення цієї ваги система швидше досягає заданої швидкості, акцентуючи увагу на мінімізації відхилень

швидкості, також її збільшення може призвести до ривків і менш плавного переходу, якщо вага надто велика.

Тому, для досягнення поставлених цілей необхідно підвищенням ваги $\delta\text{Velocity}$ та зменшенням ваги δR отримати досить швидкий і плавний вихід на номінальну швидкість, при цьому ж зворотні дії дозволяють зменшити пікові значення потужності ривки і перерегулювання.

2.2.1. Розрахунок оптимального LQ регулятора для першої конфігурації системи

Першочергово мною було підбрано вагові коефіцієнти для LQ регулятора, який керуватиме системою з параметрами $l = 12\text{м}$ та навантаженням $m = 20000\text{кг}$. При цьому тривалість регулювання складає 10секунд, тривалість розгону – 4секунди а номінальна швидкість візка, якої потрібно досягти рівна 0.5м/с. Такі ж параметри використовуватимуться у всіх наступних експериментах.

Підбираючи вагові коефіцієнти було отримано наступну систему керування, графіки до якої наведено нижче.

При заданні вагових параметрів, представлених нижче я отримав наступні графіки зміни рушійних сил, потужності та швидкості.

Значення вагових параметрів:

$$\delta R = 8 \cdot 10^{-9}$$

$$\delta F_1 = 10^{-5}$$

$$\delta F_2 = 2 \cdot 10^{-6}$$

$$\delta \text{Position} = 10^{-3}$$

$$\delta \text{Velocity} = 10^3$$

На рисунках 2.4, 2.5 та 2.6 зображено графіки зміни рушійної сили, її швидкості та прискорення. З цих графіків можна спостерігати, що на початку регулювання, коли відбувається стрибок швидкості, пік рушійної сили складає

4053 Н, пікове значення швидкості зміни рушійної сили складає 6555 Н/с, а максимальне значення прискорення рушійної сили рівне 247457 Н/с².

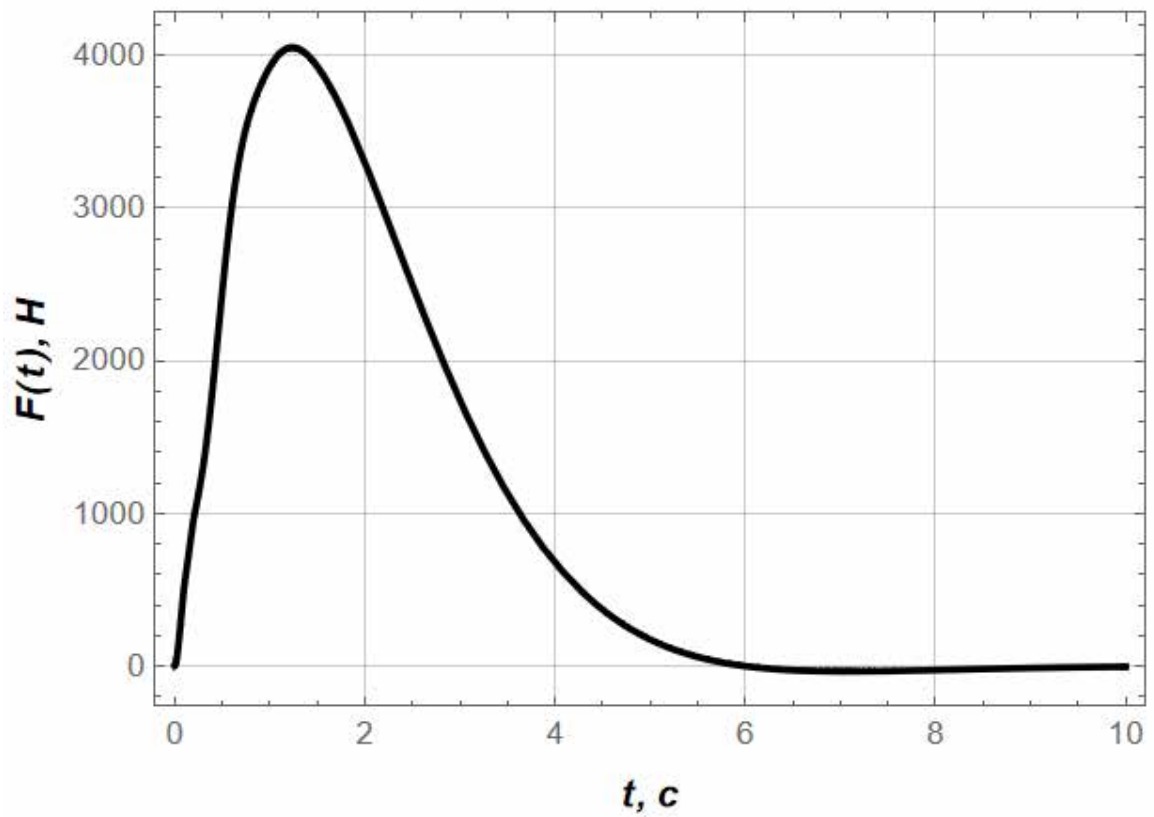


Рисунок 2.4 – Графік зміни рушійної сили по часу

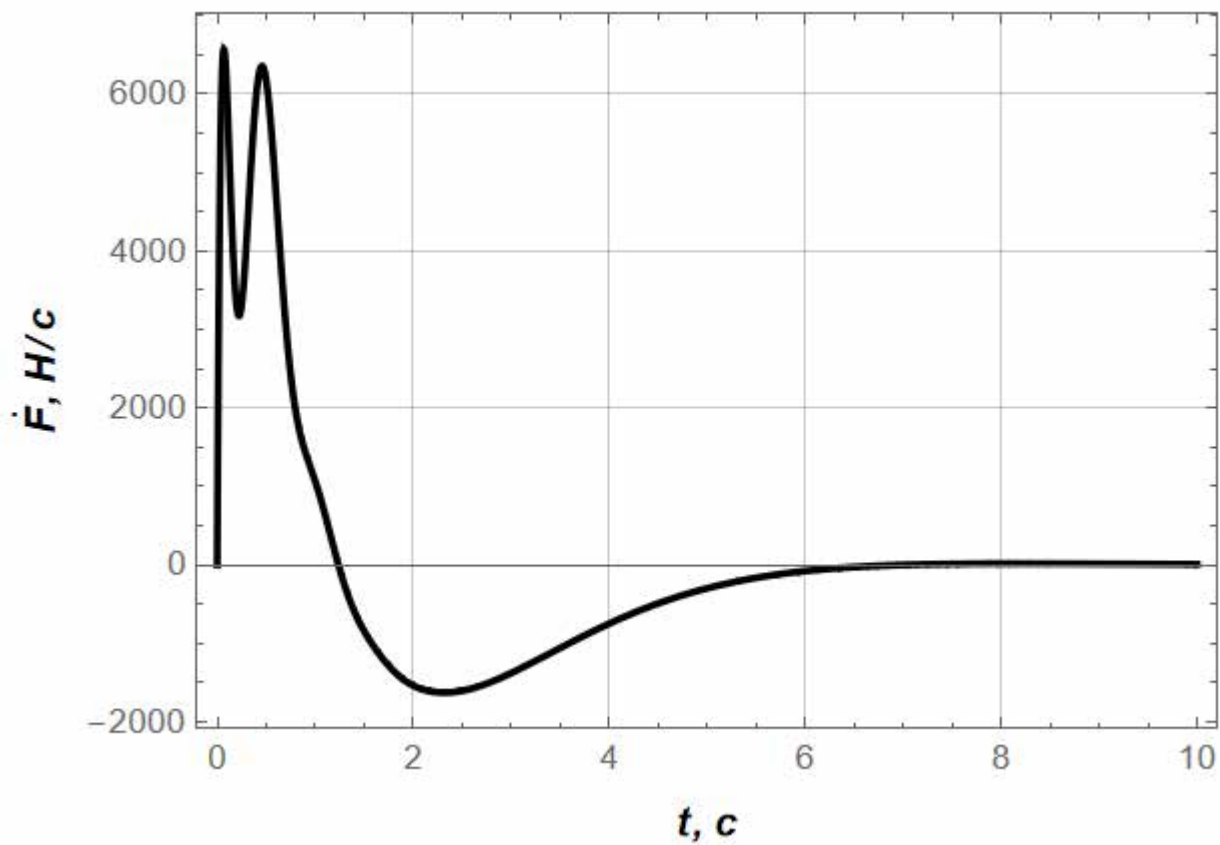


Рисунок 2.5 – Графік зміни першої похідної рушійної сили

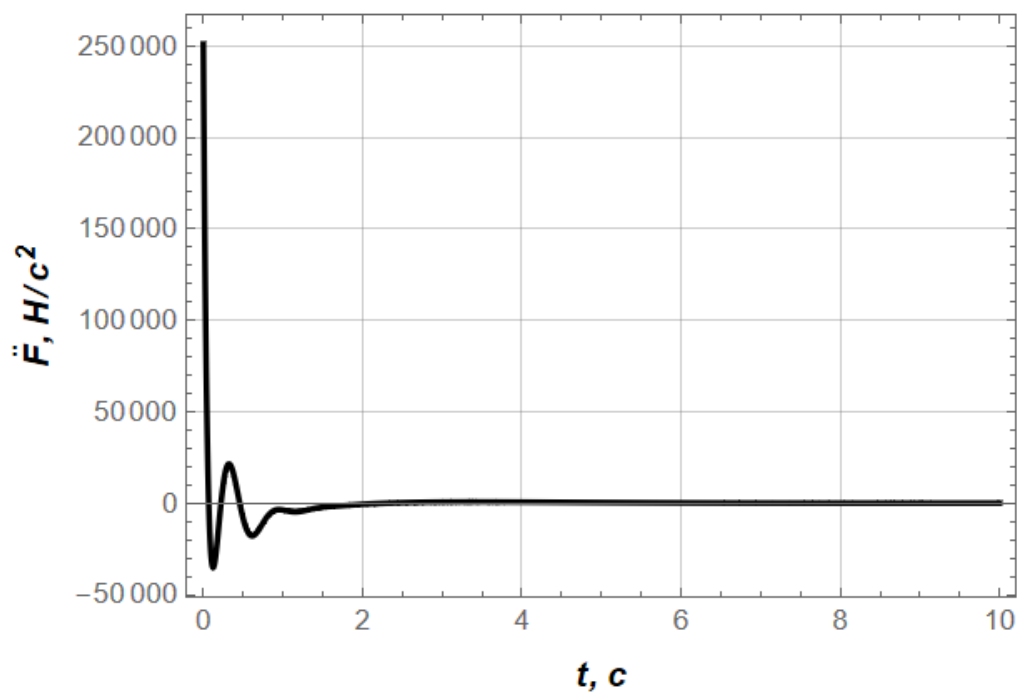


Рисунок 2.6 – Графік зміни другої похідної рушійної сили по часу

Графік зміни потужності наведено на рисунку 2.7. З графіка можна бачити також стрибок потужності на початку. Приблизно через півсекунди від початку руху її значення складає 894Вт, після чого відбувається поступовий спад, який, в цілому, відображає яким чином відбувається регулювання на вихід на номінальну швидкість.

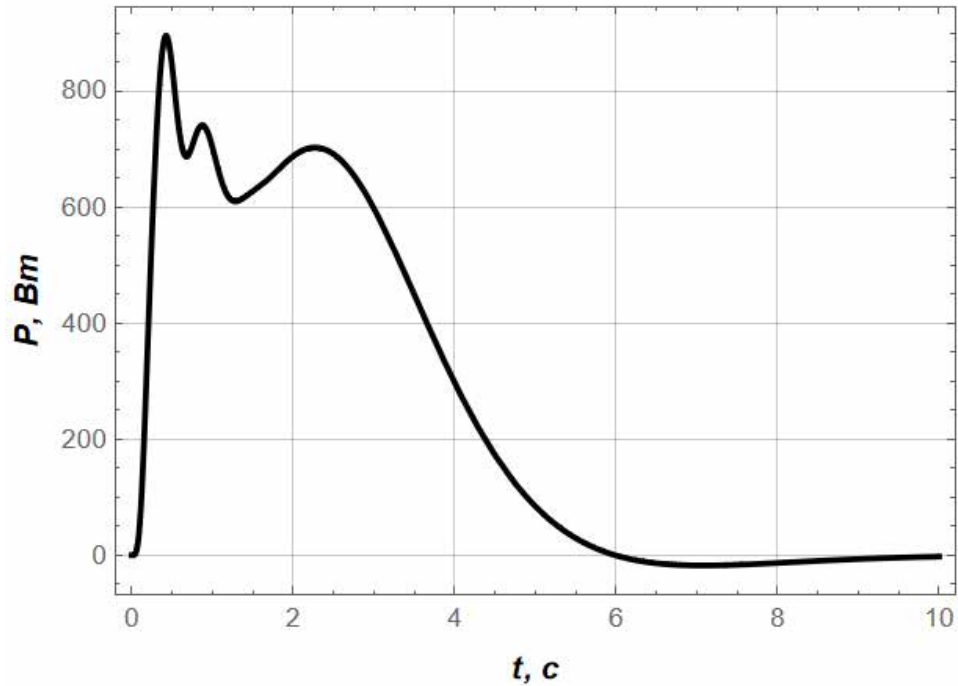


Рисунок 2.7 – Графіки зміни потужності протягом регулювання

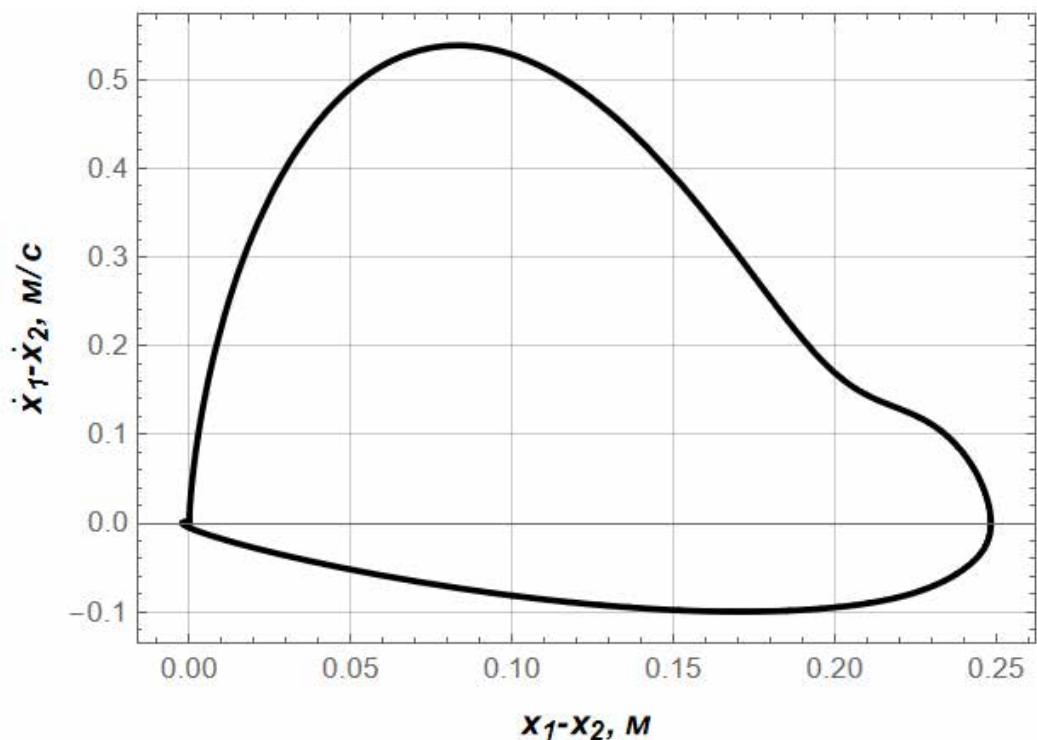


Рисунок 2.8 – Полярний графік різниці швидкості та положення

На рисунку 2.8, наведеному вище, зображено графіки різниці в швидкості та положенні протягом регулювання. Такий графік наочно дозволяє побачити як відбувається регулювання та поступовий вихід на номінальну швидкість. В той же час видно, що в кінці регулювання різниця заданого та поточного положення складає 4мм, що цілком задовольняє нашим вимогам.

На рисунку 2.9 показано графік зміни швидкості за час регулювання в 10 секунд. З графіка видно, що досить високе значення ваги $\delta Velocity$ дозволяє швидко вийти на усталену швидкість, але на початку регулювання присутній стрибок на величину в 0,54м/с. Потім поступово відбувається спад швидкості та плавний вихід на усталену швидкість 0,5м/с. Важливо також відзначити, що після стрибка на початку перерегулювання повністю відсутнє, тобто одна з основних вимог до системи керування виконана!

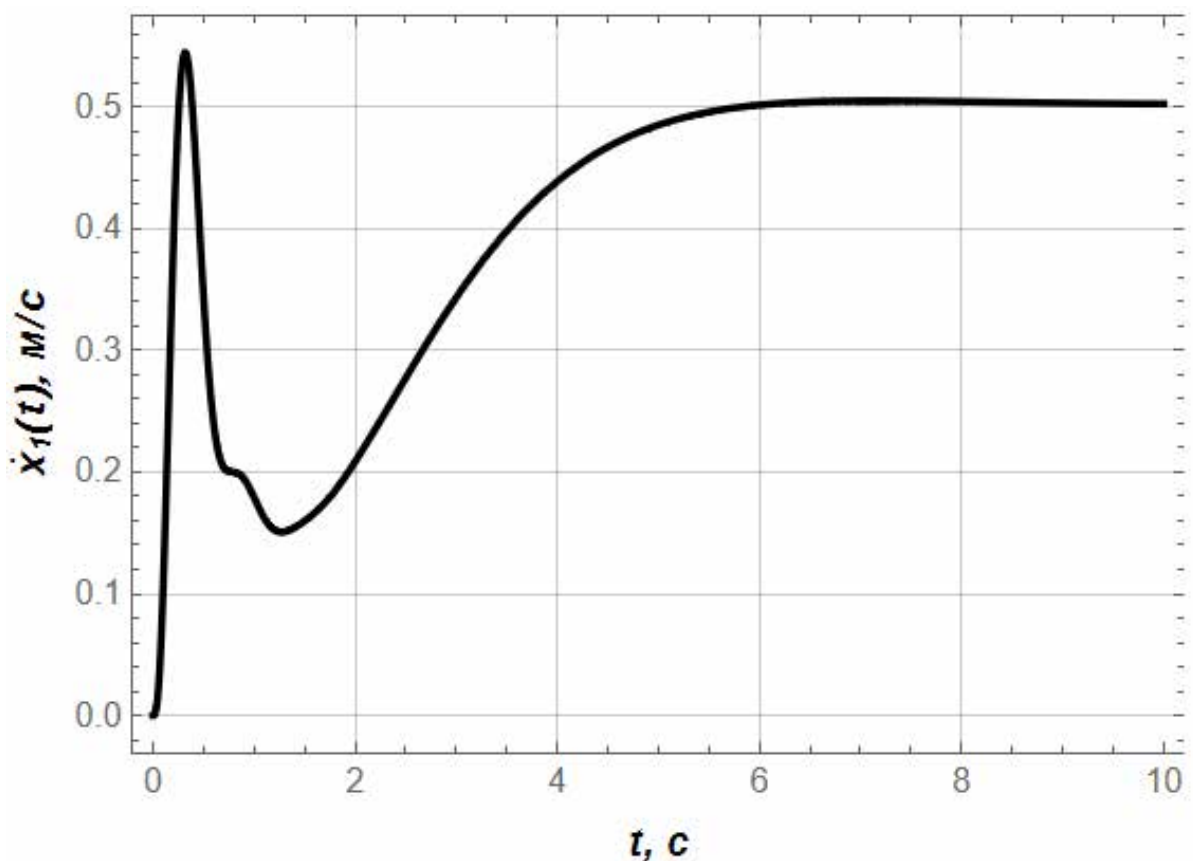


Рисунок 2.9 – Графіки зміни швидкості протягом регулювання

Номінальна швидкість руху візка з вантажем досягається приблизно через 5,5сек від початку регулювання.

При підборі параметрів регулятора я намагався уникати коливань графіку зміни швидкості та перерегулювань на ділянці графіку правіше початкового стрибку.

Отже, з такими підібраними ваговими коефіцієнтами ми отримали наступні коефіцієнти лінійно-квадратичного оптимального регулятора руху механізму зміни вильоту вантажу:

$$-3,10108 \cdot 10^6; 3,10158 \cdot 10^6; 82919,9; 418000; 233,367; 26,7719$$

2.2.2. Розрахунок оптимального LQ регулятора для другої конфігурації системи

Наступним етапом дослідження є розробка такого ж регулятора вже для інших параметрів системи, а саме для вильоту в 12м та навантаження 200кг. Подальші розрахунки відбуватимуться аналогічним чином як і для попереднього варіанту. Першочергово необхідно підібрати вагові коефіцієнти для LQ регулятора таким чином, щоб задовольнити вимогам оптимального керування, які вже згадувались вище.

Експериментальним шляхом було визначено оптимальні вагові коефіцієнти для даної конфігурації системи:

$$\delta R = 10^{-5}$$

$$\delta F_1 = 10^{-6}$$

$$\delta F_2 = 10^{-7}$$

$$\delta \text{Position} = 10^{-3}$$

$$\delta \text{Velocity} = 10^4$$

Встановлення таких ваг дозволяє отримати оптимальне керування механізмом зміни вильоту баштового крану. Коефіцієнти лінійно-квадратичного оптимального регулятора набувають вигляду: 17738; -17723,9; 39910,1; 4826,52; 66,5335; 11,5359.

Графіки зміни параметрів системи наведено нижче.

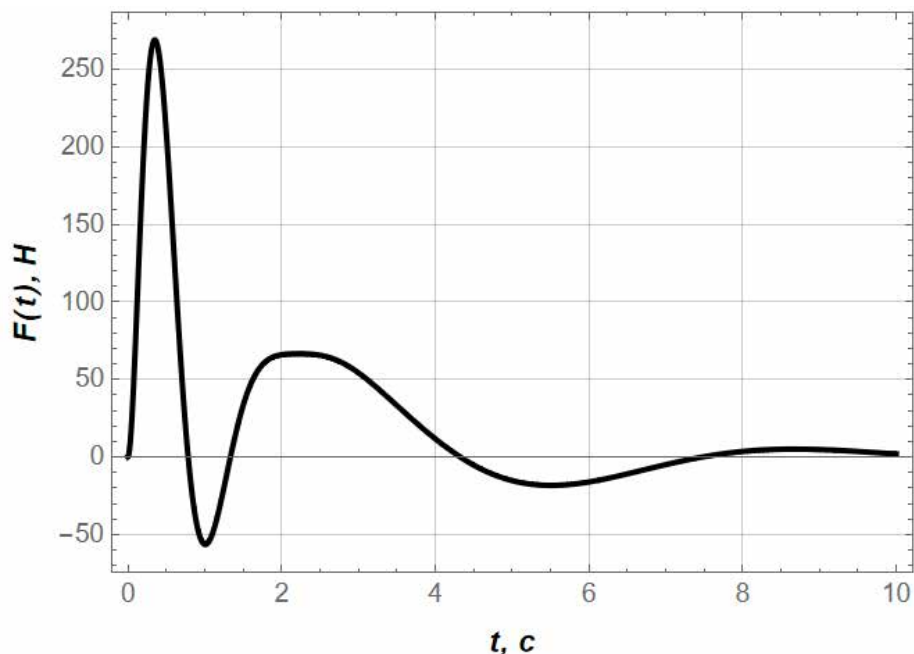


Рисунок 2.10 - Графік зміни рушійної сили по часу

На рисунках 2.10, 2.11 та 2.12 зображено графіки зміни рушійної сили, її швидкості та прискорення. З цих графіків можна спостерігати, що на початку регулювання, коли відбувається стрибок швидкості, пік рушійної сили складає 268 Н, пікове значення швидкості зміни рушійної сили складає 1218 Н/с, а максимальне значення прискорення рушійної сили рівне 22201 Н/с².

Очевидно, що зменшивши вагу на підвісі з 20000кг до 200кг необхідно прикласти набагато менше зусилля для зрушення візка.

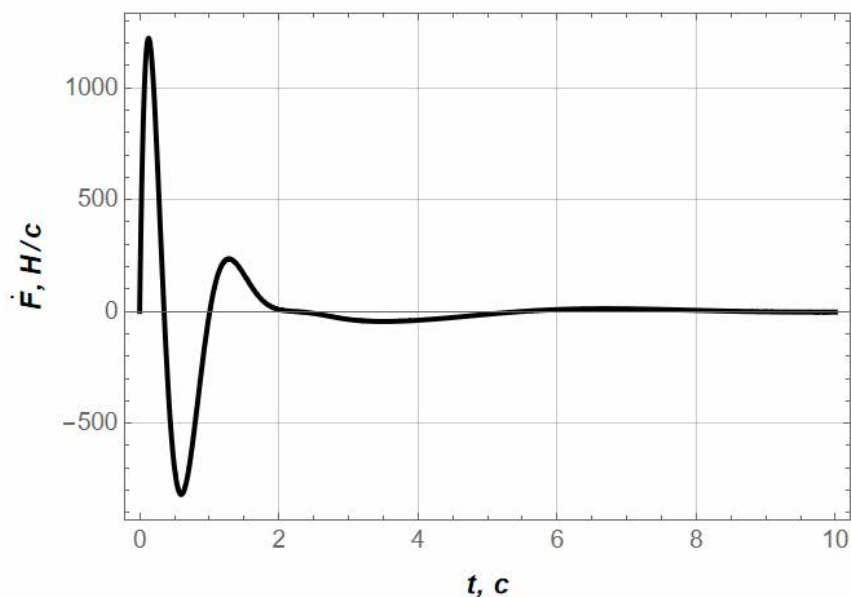


Рисунок 2.11 - Графік зміни першої похідної рушійної сили по часу

Також можна спостерігати коливання цих графіків від плюсових до від'ємних значень, що вказує на осциляції при досягненні номінальної швидкості. Також на це впливає вага LQ регулятора, що відповідає за досягнення необхідного положення.

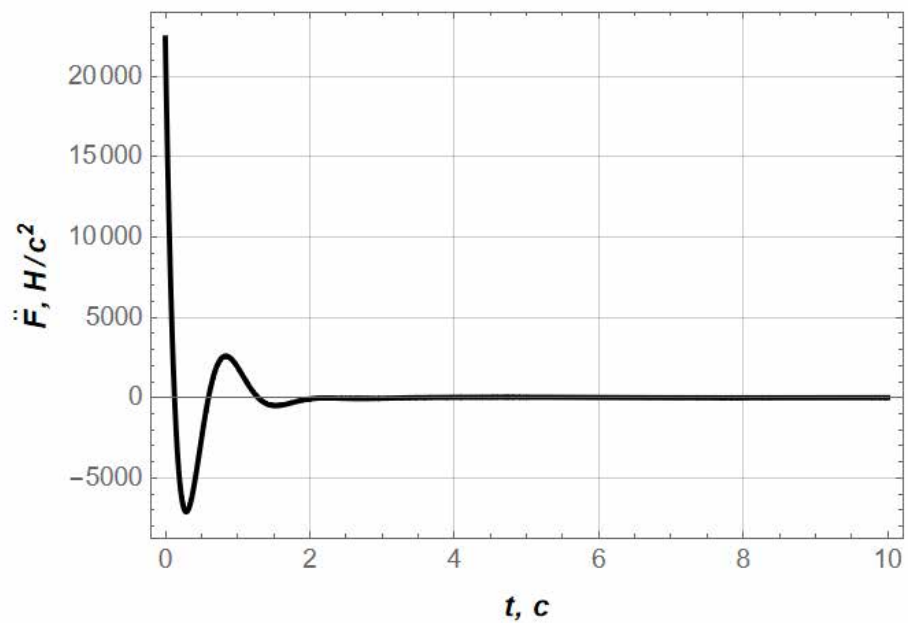


Рисунок 2.12 - Графік зміни другої похідної рушійної сили по часу

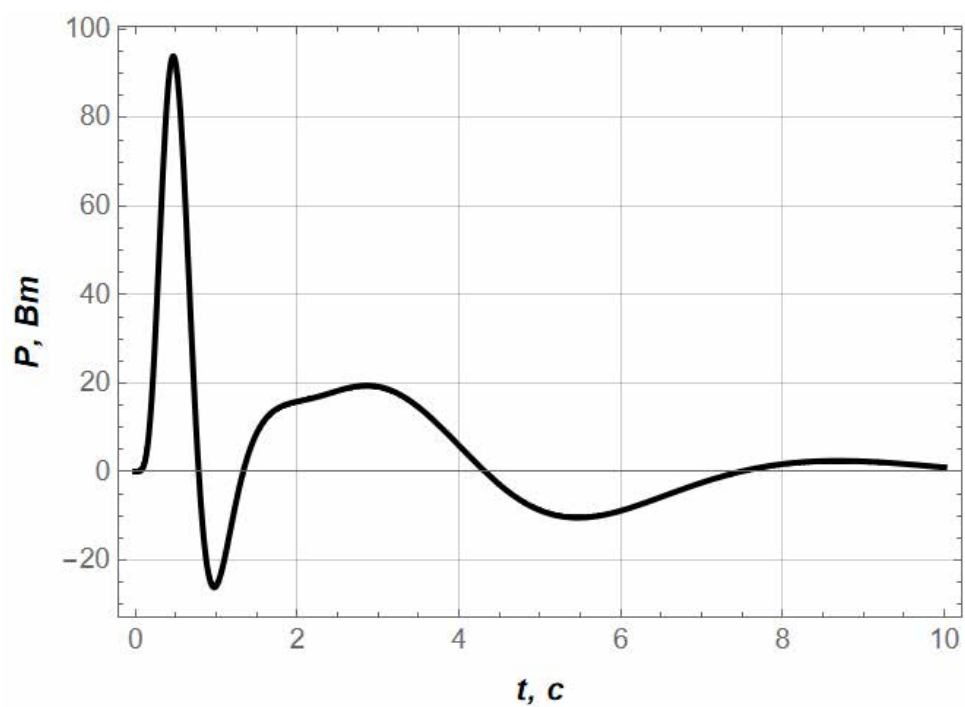


Рисунок 2.13 – Графік зміни потужності протягом регулювання

З графіку на рис.2.13 можна бачити різкий стрибок потужності на початку регулювання, який в піку рівний 93,8Вт, що досить незначна величина. Далі поступово відбувається спад до від'ємного значення, що вказує на коливання системи та її потуги до виходу на номінальну швидкість та задане положення. По проходженні 4 секунд видно вже більше плавне регулювання та поступове згасання графіку.

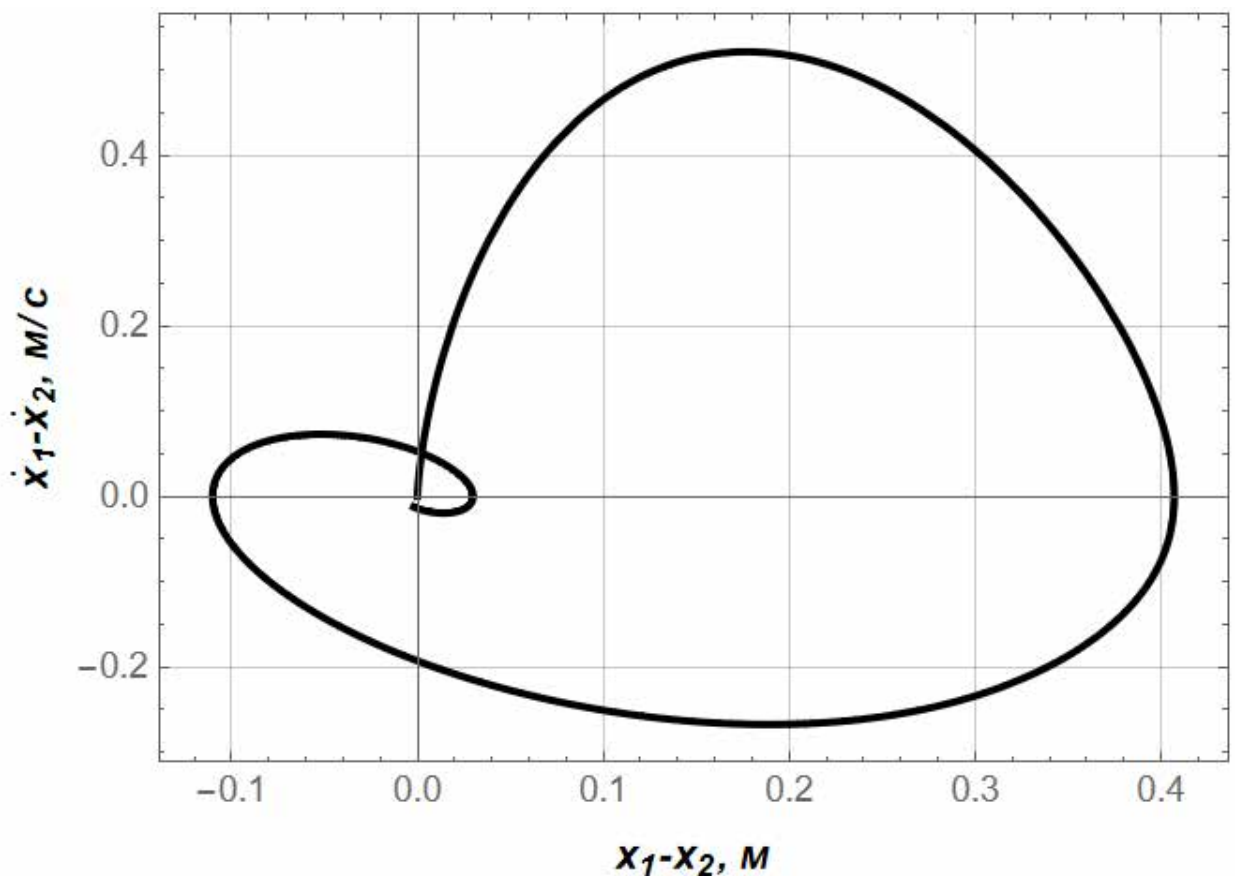


Рисунок 2.14 - Полярний графік різниці швидкості та положення

На рисунку 2.14, що наведений вище, зображено графіки різниці в швидкості та положенні протягом регулювання. Можна бачити, що в кінці регулювання різниця заданого та поточного положення складає 13мм, що в цілому задовольняє нашим вимогам, враховуючи габарити крану та вантажу таке відхилення від заданого положення є досить незначним.

На рисунку 2.15 показано графік зміни швидкості за час регулювання в 10 секунд. Можна бачити на початку регулювання стрибок швидкості

величиною в 0,552м/с. Потім поступово відбувається спад швидкості та плавний її ріст з незначним перерегулюванням в 0,572м/с, після чого вже є вихід на усталену швидкість. На жаль, при такій конфігурації навантаження та вильоту не вдалось підібрати настільки вдалі ваги коефіцієнтів LQ регулятора, щоб виконати умову відсутності перерегулювання. Було проведено близько 20ти експериментів і цей варіант найкращий з них.

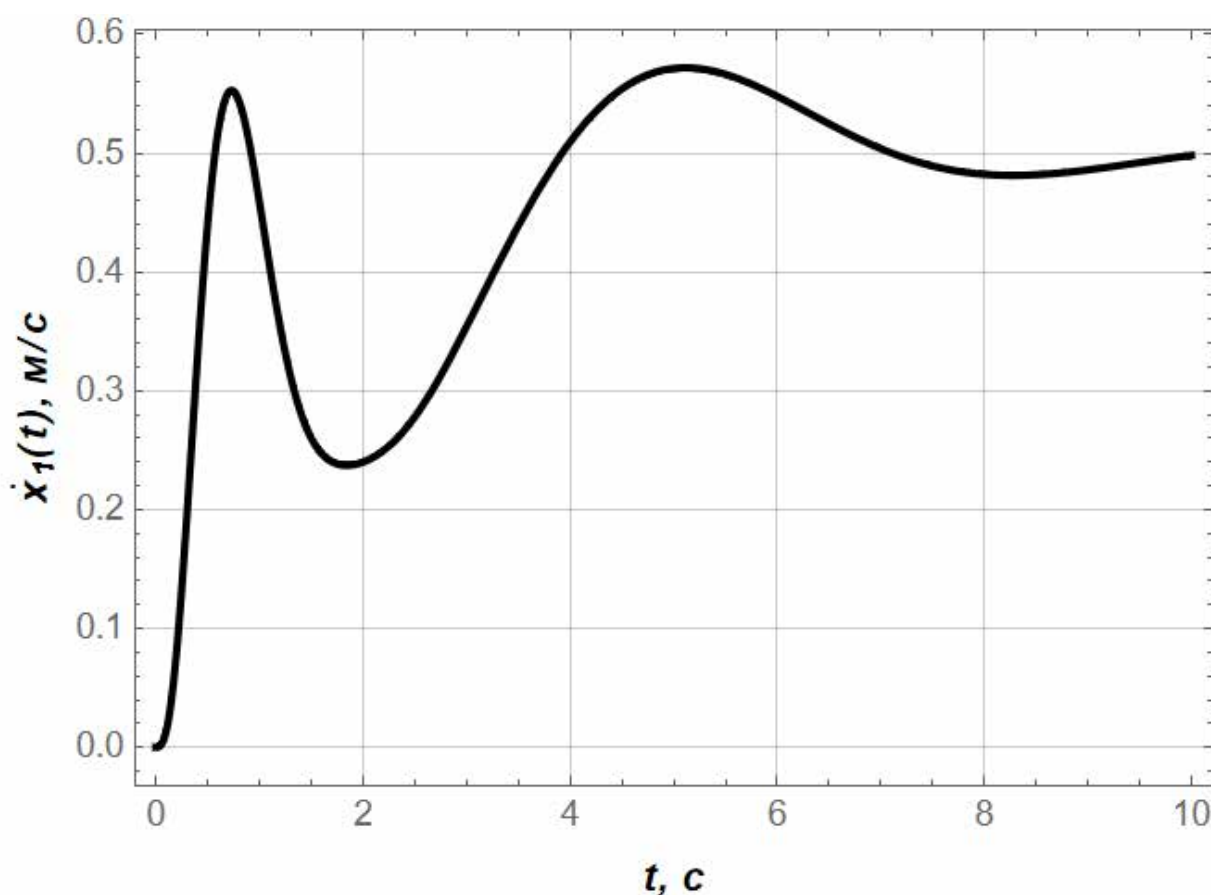


Рисунок 2.15 – Графіки зміни швидкості

2.2.3. Розрахунок оптимального LQ регулятора для третьої конфігурації системи

Тепер потрібно дослідити яким чином буде відбуватись керування системою з її конфігурацією 2м вильоту та з навантаженням 20000кг. Алгоритм дій залишається таким же, як і в попередніх двох дослідях. Важливо врахувати, що величина вильоту тепер в 6 разів менша за попередні варіанти, тому значення ваг, а відповідно й коефіцієнти LQ регулятора будуть іншими, щоб задовольнити вимогам оптимального регулювання.

Дослідним шляхом встановлено, що при таких вагових коефіцієнтах буде отримано оптимальне керування:

$$\delta R = 10^{-7}$$

$$\delta F_1 = 10^{-9}$$

$$\delta F_2 = 10^{-5}$$

$$\delta \text{Position} = 10^{-8}$$

$$\delta \text{Velocity} = 10^2$$

Можна бачити, що величина ваги Швидкості для цієї конфігурації системи є досить незначної і її цілком достатньо для отримання прийняттого результату. Коефіцієнти лінійно-квадратичного оптимального регулятора мають такі значення : 15583, -15582,6, 41108,9, 3613,02, 80,5389, 16,1579.

Графіки зміни параметрів системи наведено нижче.

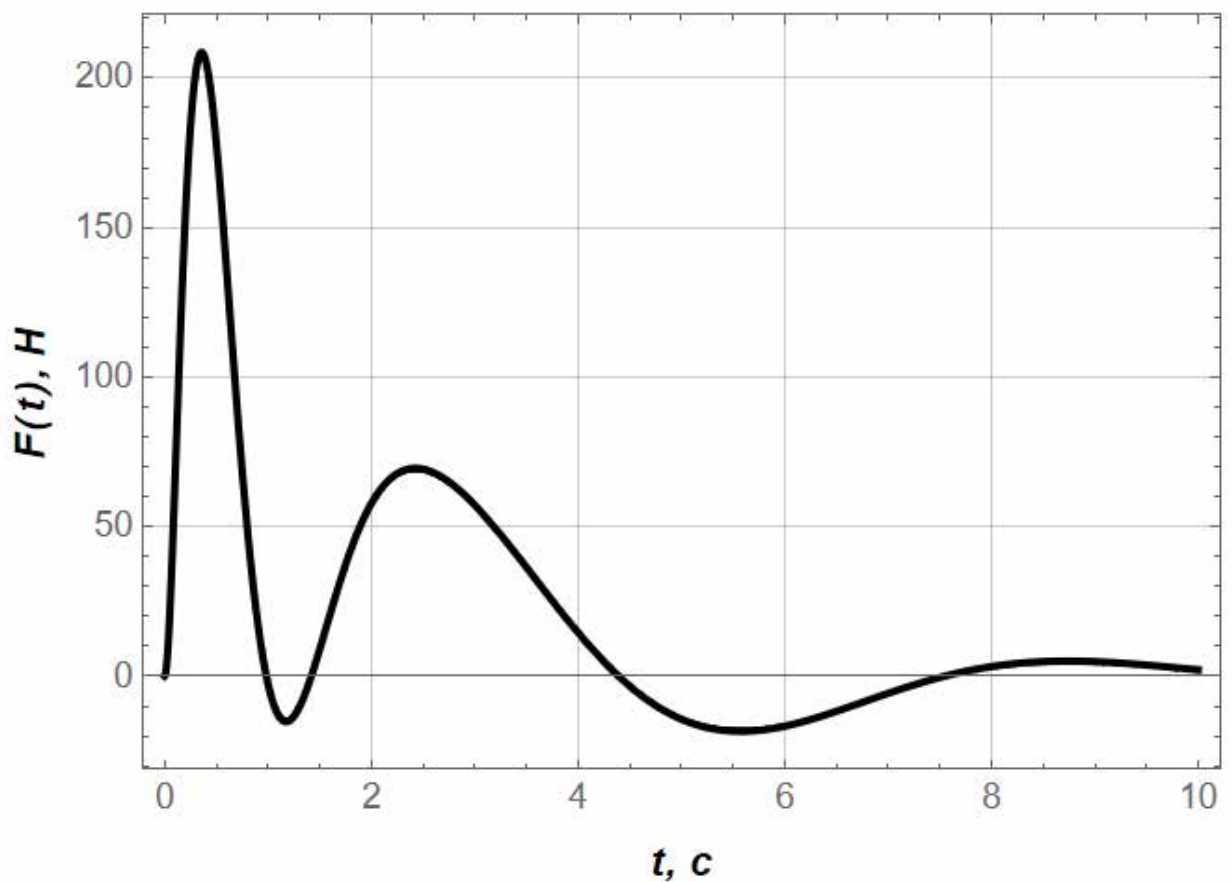


Рисунок 2.16 - Графік зміни рушійної сили по часу

На рисунках 2.16, 2.17 та 2.18 зображено графіки зміни рушійної сили, її швидкості та прискорення. Аналізуючи графіки можна дійти до висновку, що на початку регулювання, коли відбувається стрибок швидкості, пік рушійної сили складає 208 Н, пікове значення швидкості зміни рушійної сили складає 961 Н/с, а максимальне значення прискорення рушійної сили рівне 22050 Н/с².

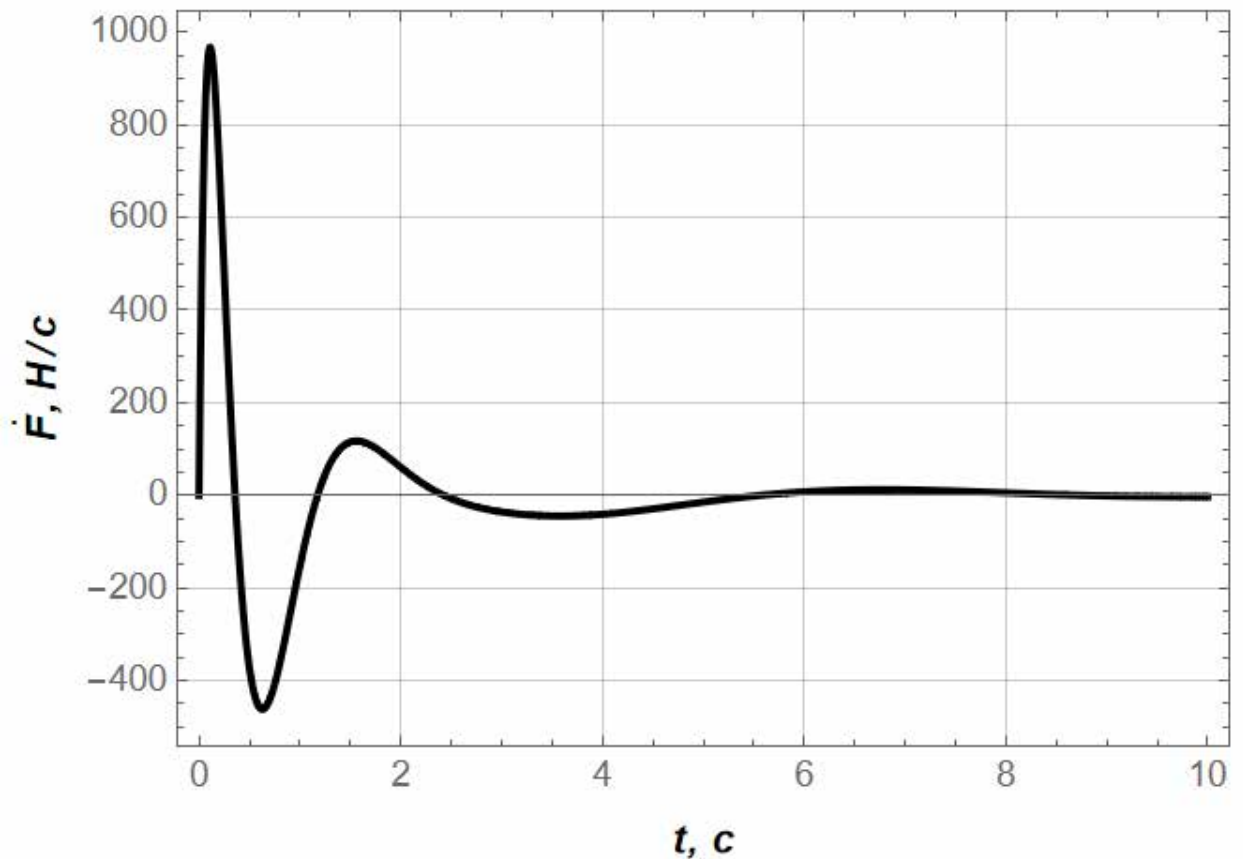


Рисунок 2.17 - Графік зміни першої похідної рушійної сили по часу

Як і в попередньому експерименті видно коливання графіків. Такі коливання показують недосконалість налаштування LQ регулятора. Можливо варто було б застосувати алгоритми по автоматичному підбору вагових коефіцієнтів, тоді можна було б досягнути найбільш близьких результатів до бажаних в короткі терміни. Такий підхід також спростив би процес налаштування регулятора виключаючи людський фактор та упередженість.

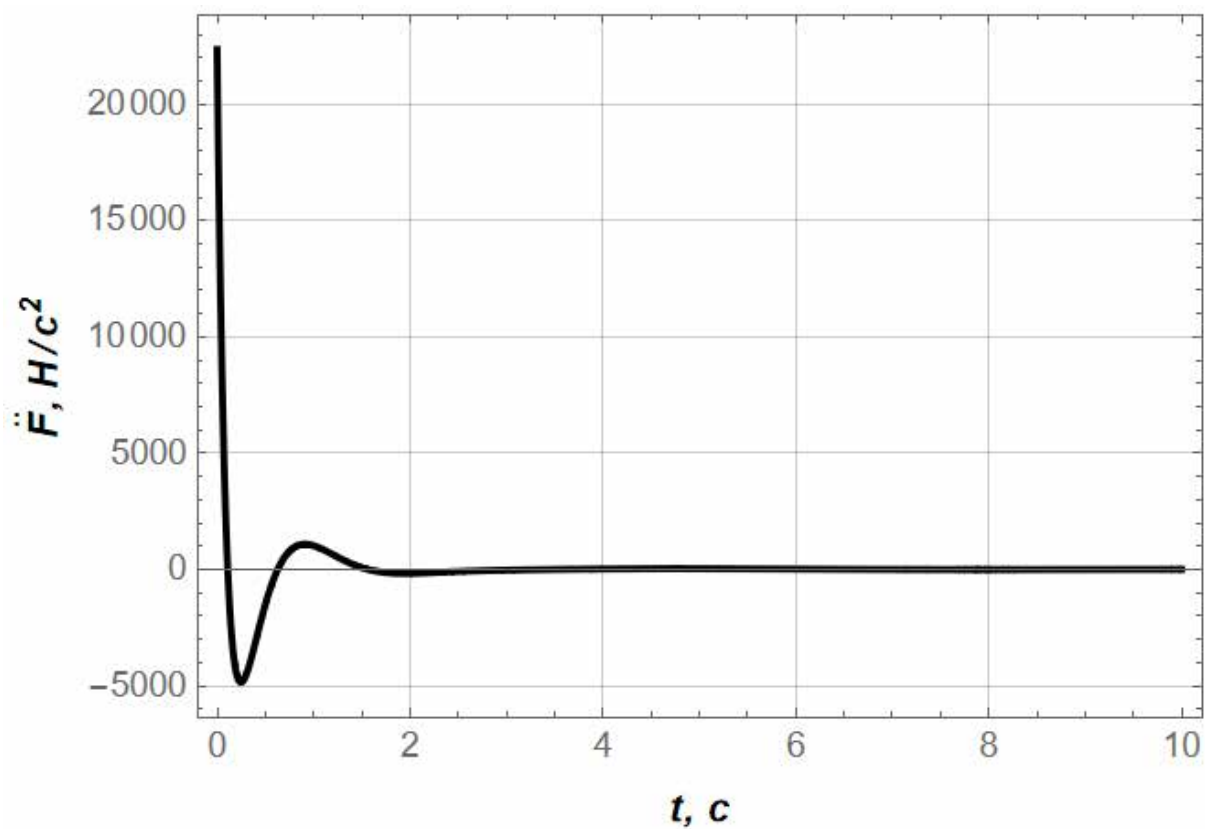


Рисунок 2.18 – Графік зміни другої похідної рушійної сили по часу

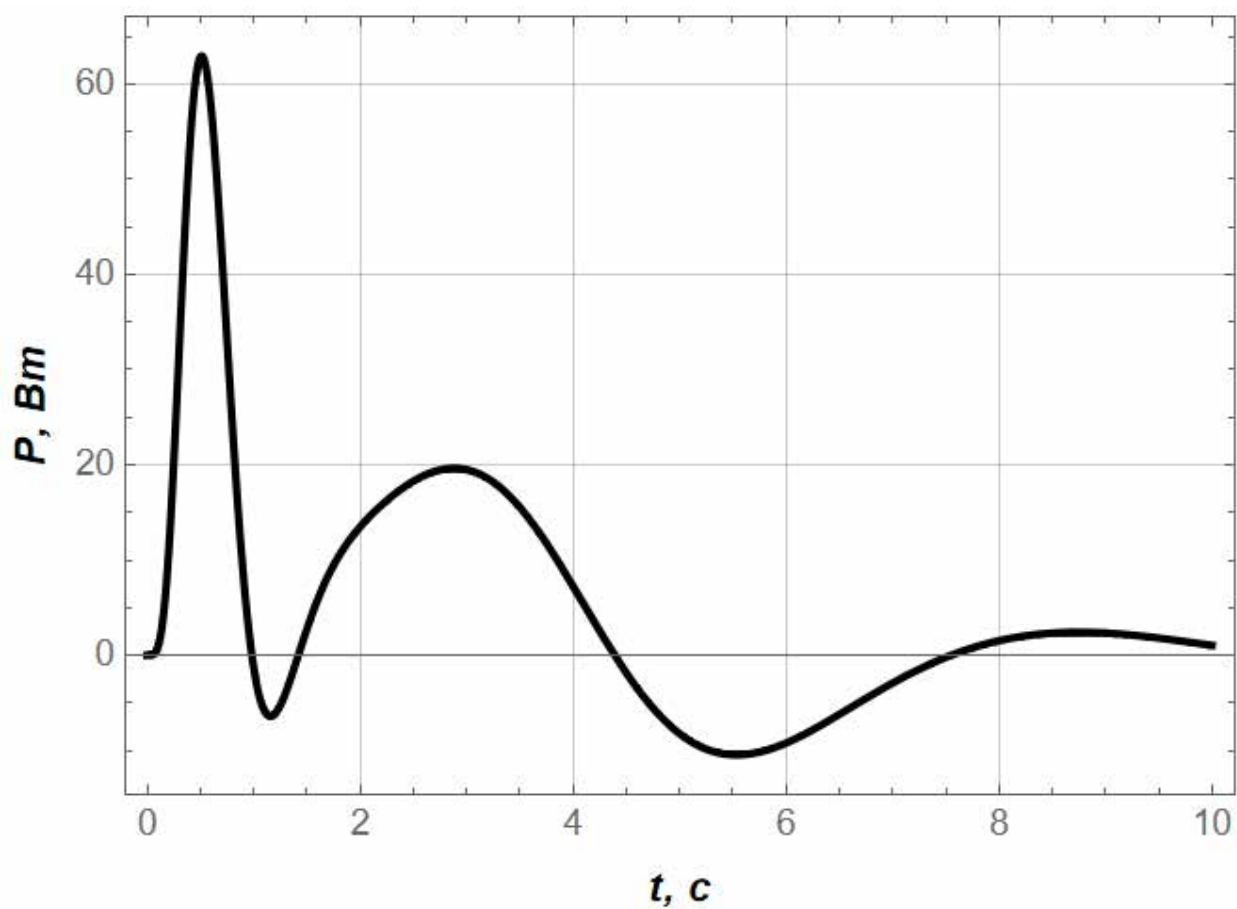


Рисунок 2.19 – Графік зміни потужності протягом регулювання

З графіку на рис.2.19 можна бачити різкий стрибок потужності на початку регулювання, який в піку рівний 62,9Вт. З плином часу відбувається поступовий спад споживаної потужності, що вказує на нестабільність системи та намагання збалансуватись. По проходженні 2 секунд видно вже більше плавне регулювання та поступове згасання графіку.

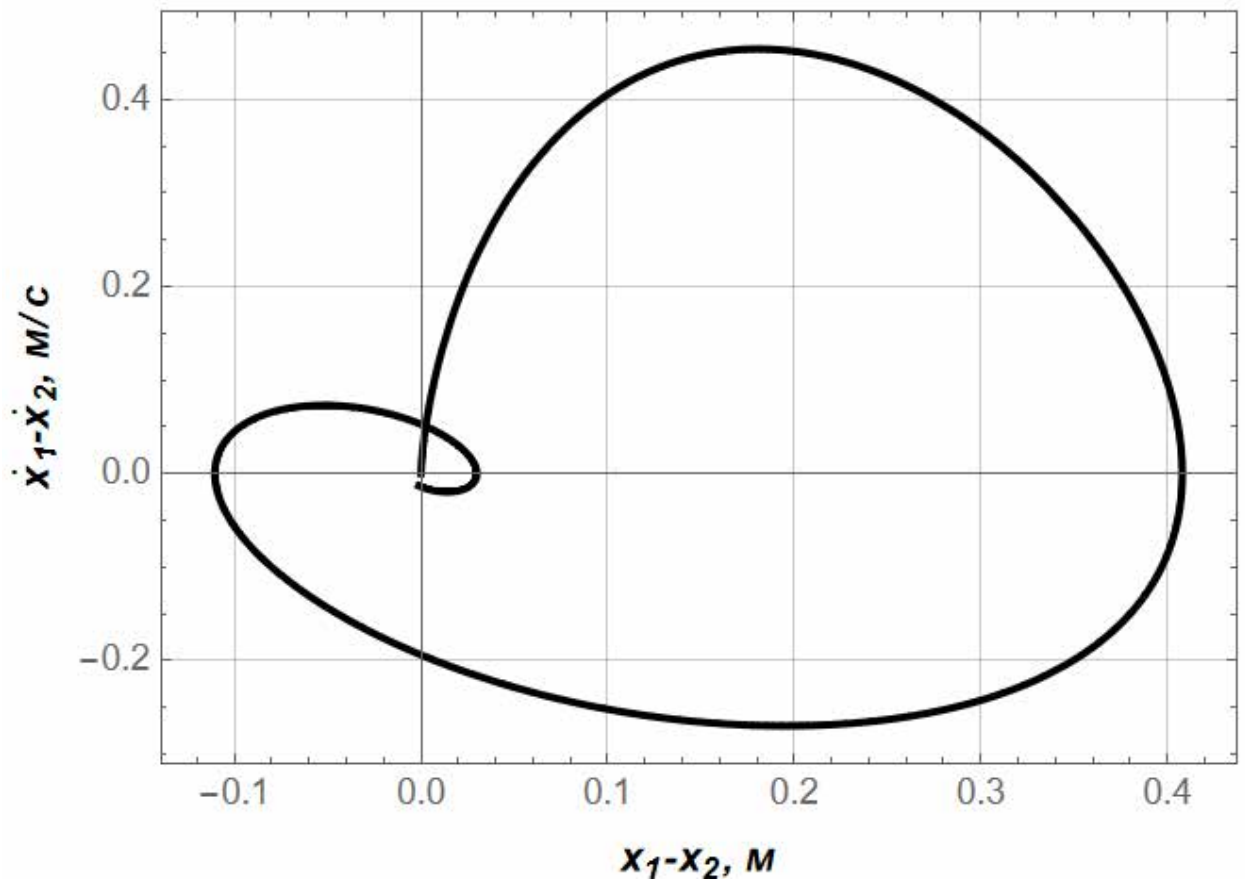


Рисунок 2.20 – Полярний графік різниці швидкості та положення

На рисунку 2.20, наведеному вище, спостерігаємо графіки різниць бажаної та поточної швидкості, а також різниці бажаного й поточного положення протягом регулювання. З'ясовано, що в кінці регулювання різниця заданого та поточного положення складає 13мм, що в цілому задовольняє нашим вимогам, враховуючи габарити крану та вантажу таке відхилення від заданого положення є досить незначним. Цей тезис є аналогічним до такого в попередньому пункті.

На рисунку 2.21 показано графік зміни швидкості за час регулювання в 10 секунд. Можна помітити на початку регулювання стрибок швидкості

величиною в 0,493/с. Потім поступово відбувається спад швидкості та плавний її ріст з незначним перерегулюванням в 0,572м/с, після чого вже є вихід на усталену швидкість. На жаль, як і в попередньому досліді, для такої конфігурації системи не вдалось підібрати вдалі ваги коефіцієнтів LQ регулятора, для досягнення умов відсутності перерегулювання. На графіку зображено кращий з варіантів, які досліджувались.

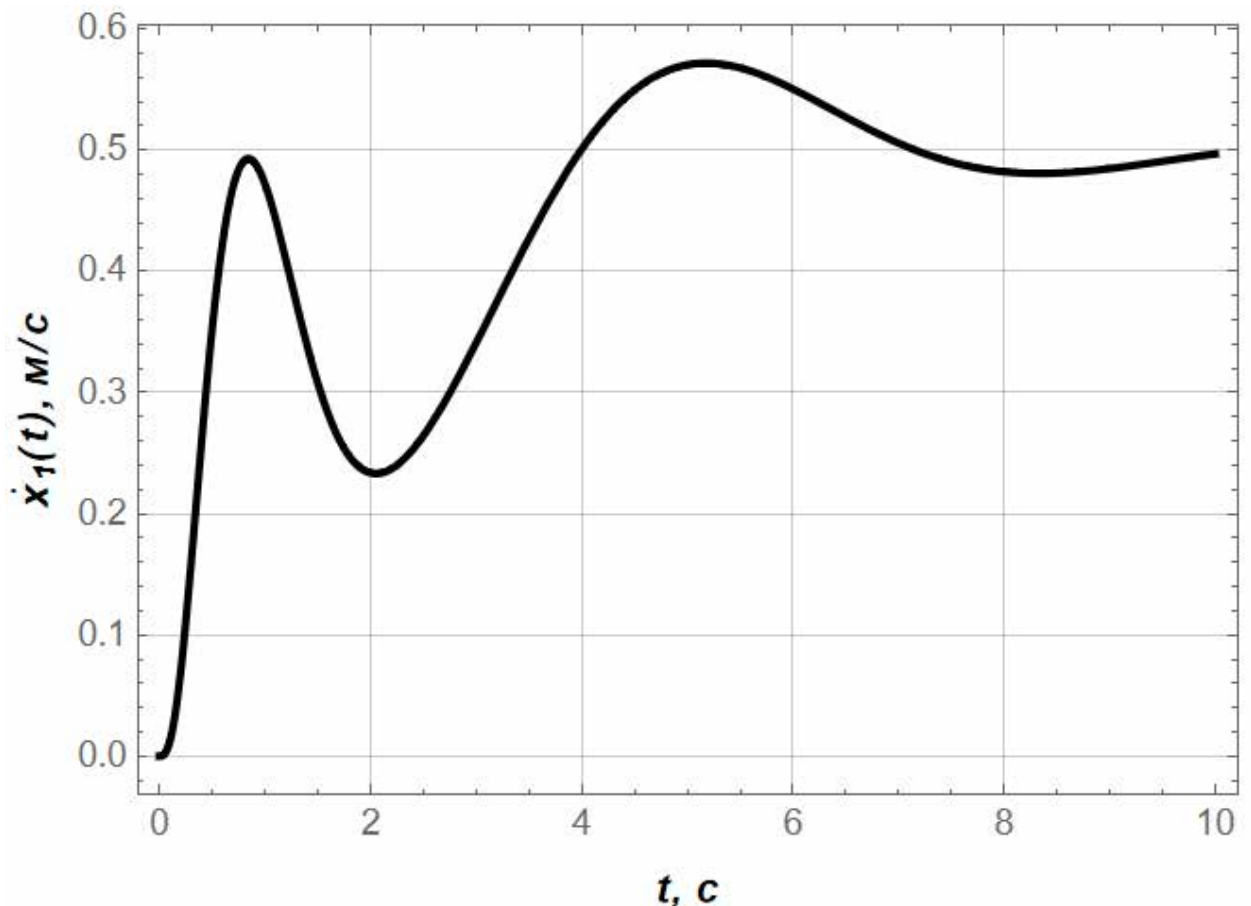


Рисунок 2.21 – Графіки зміни швидкості

2.2.4. Розрахунок оптимального LQ регулятора для четвертої конфігурації системи

Останній експеримент має на меті дослідити налаштування LQ регулятора для конфігурації системи з вильотом 2м та навантаженням 200кг. Аналогічно до попередніх трьох дослідів проведемо підбір вагових коефіцієнтів, поступово корегуючи їх величини залежно від результатів аналізу графіку зміни швидкості. Оскільки першочергово стоїть задача якнайшвидшого виходу на номінальну швидкість з мінімальним перерегулюванням, то

відштовхуватись потрібно саме від графіку зміни швидкості протягом регулювання.

Провівши кілька дослідів було виявлено, що система найкраще себе показує з наступними значеннями вагових коефіцієнтів регулятора:

$$\delta R = 10^{-8}$$

$$\delta F_1 = 10^{-4}$$

$$\delta F_2 = 10^{-8}$$

$$\delta \text{Position} = 10^{-9}$$

$$\delta \text{Velocity} = 4 \cdot 10^4$$

Саме такий набір ваг дозволив досягти оптимального регулювання системою керування зміни вильоту стріли роботизованого баштового крана. Навіть незначне їх коригування призводить до появи коливань та небажаних ривків при русі. Коефіцієнти лінійно-квадратичного оптимального регулятора набули наступних величин : $-4,3021 \cdot 10^7$, $4,3021 \cdot 10^7$, -402853 , $3,23128 \cdot 10^6$, $553,297$, $33,2805$. Графіки зміни параметрів системи наведено нижче.

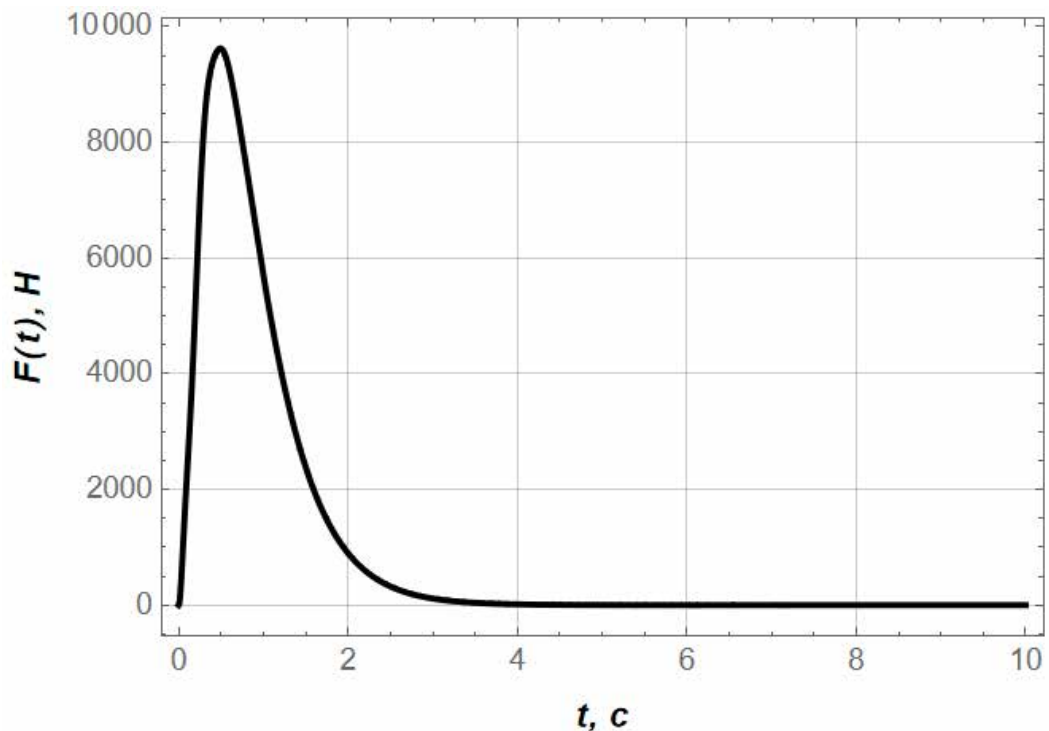


Рисунок 2.22 – Графік зміни рушійної сили по часу

На рисунках 2.22, 2.23 та 2.24 сформовано графіки змін рушійної сили, її швидкості та прискорення. Помітно, що, що на початку регулювання, як і у всіх попередніх дослідах, коли відбувається стрибок швидкості, пік рушійної сили складає 9605 Н, пікове значення швидкості зміни рушійної сили складає 35448 Н/с, а максимальне значення прискорення рушійної сили рівне 1.4 MN/c^2 .

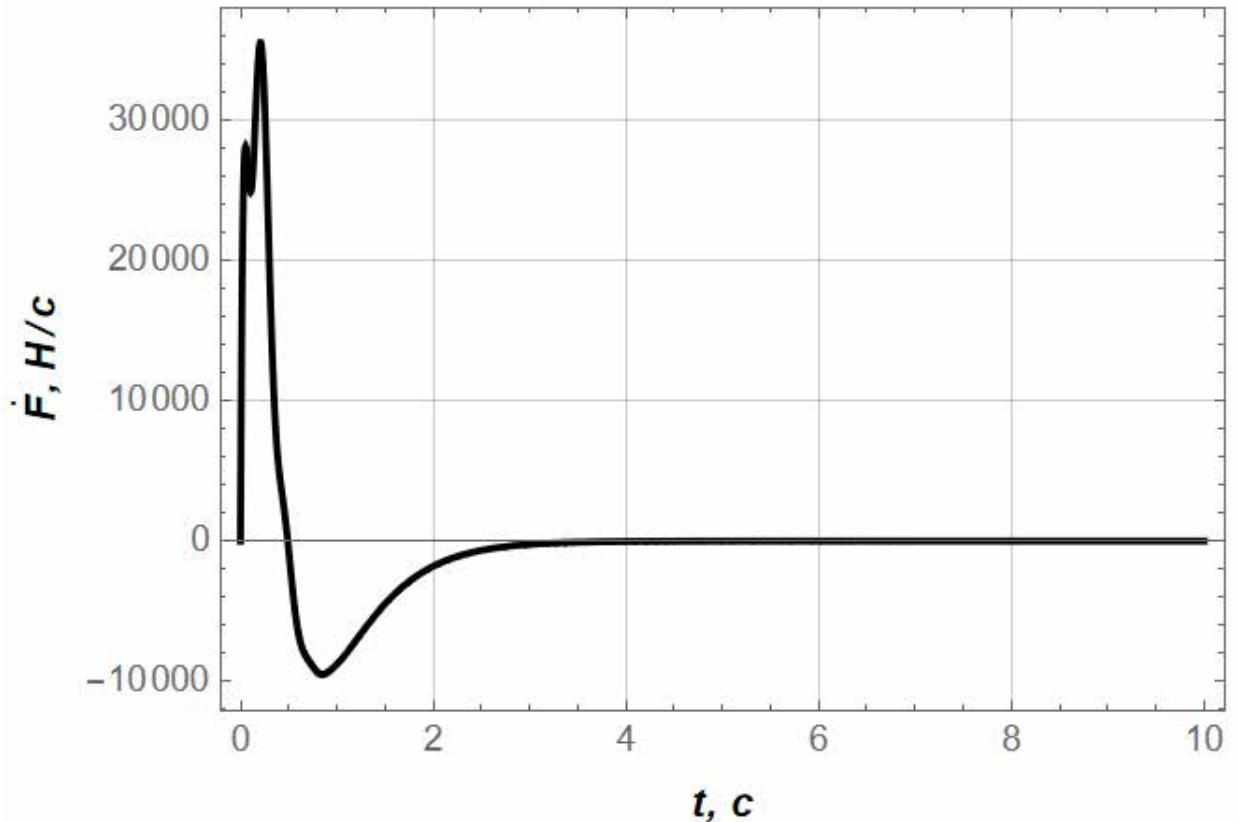


Рисунок 2.23 - Графік зміни першої похідної рушійної сили по часу

Як і у всіх попередніх дослідах спостерігаються коливання графіків. Можна зробити висновок про повторюваність отримуваних результатів досліджень. Це може вказувати на вірність підходу та підбору коректних вагових коефіцієнтів.

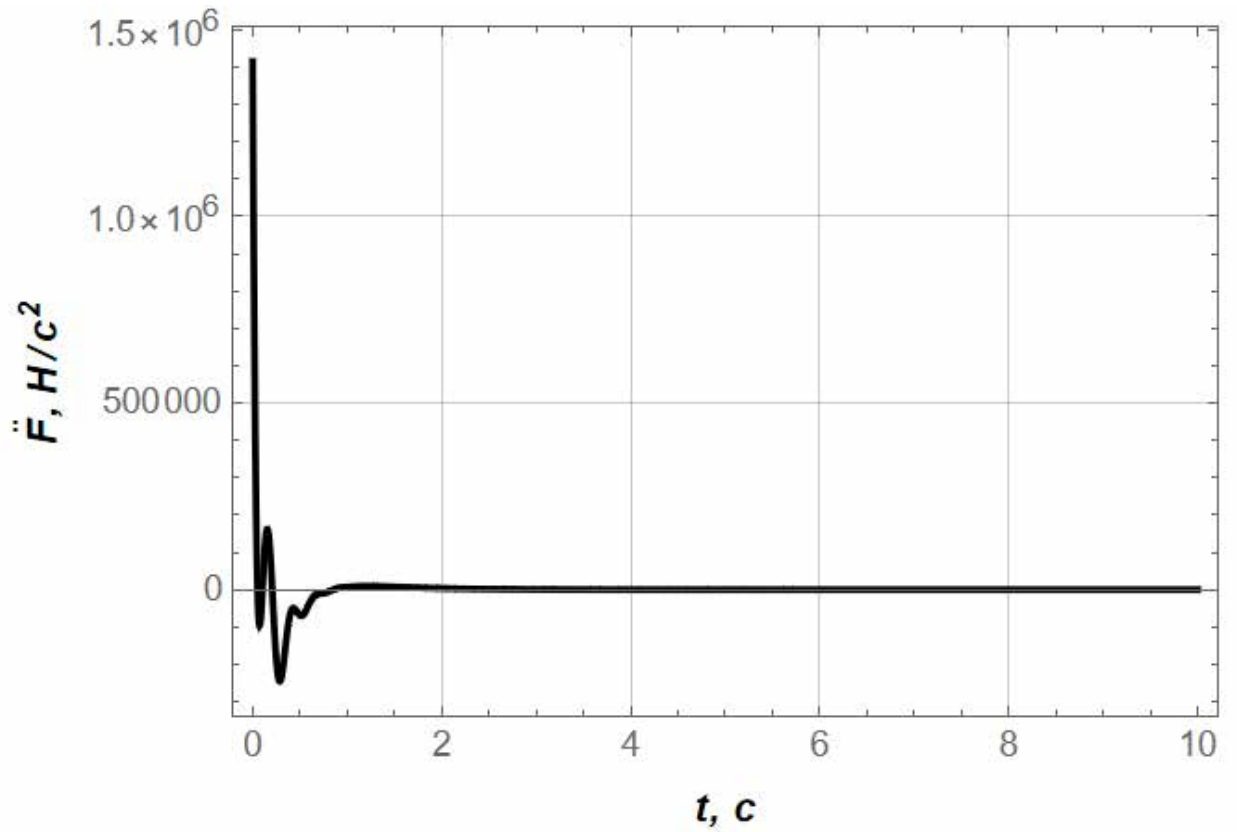


Рисунок 2.24 – Графік зміни другої похідної рушійної сили по часу

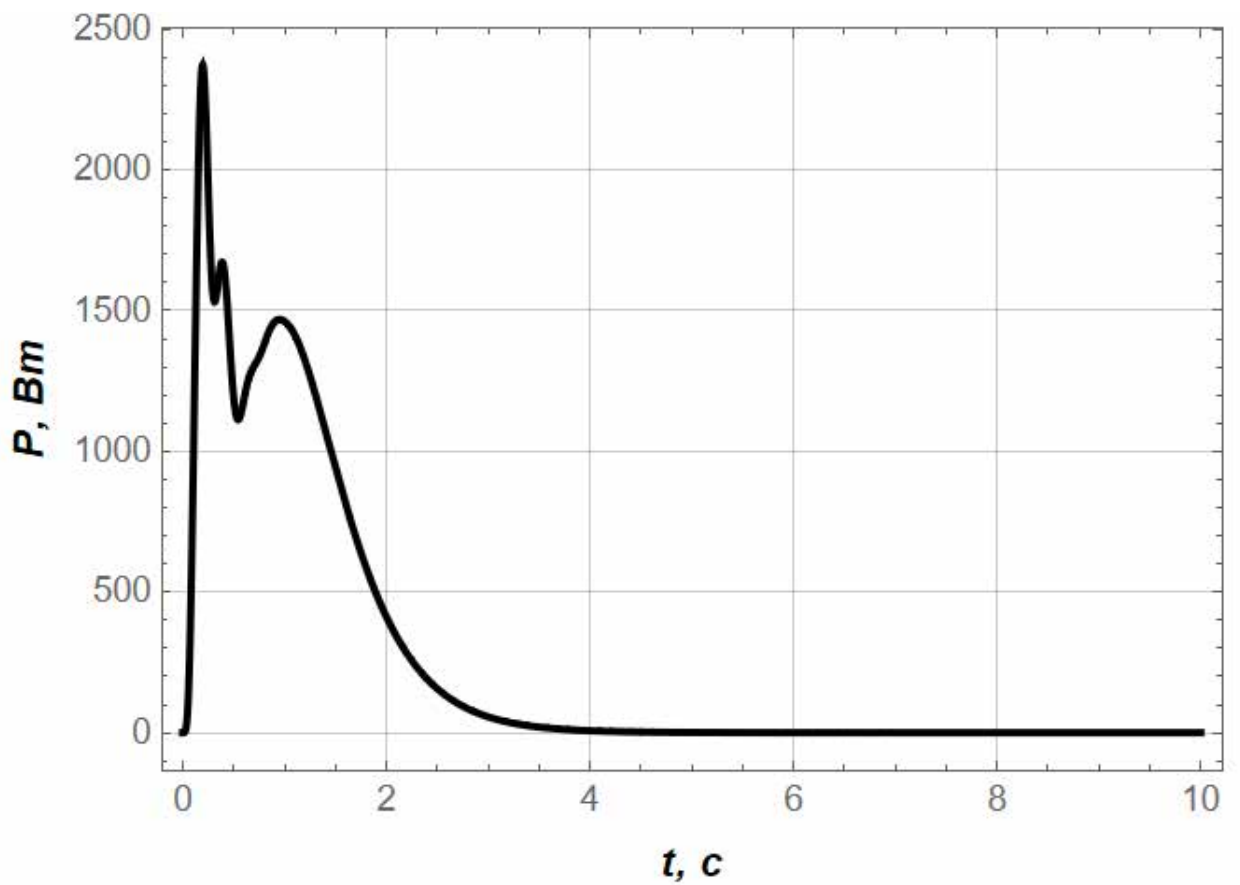


Рисунок 2.25 – Графік зміни потужності протягом регулювання

На графіку рис.2.25 спостерігаємо різкий стрибок потужності на початку регулювання, який в піку складає 2369Вт. З плином часу відбувається поступовий спад споживаної потужності з невеликими коливаннями, що вказує на бажання системи скоректувати спад потужності і, як наслідок, зменшення швидкості. По проходженні 1 секунди видно вже більш плавне регулювання та спад.

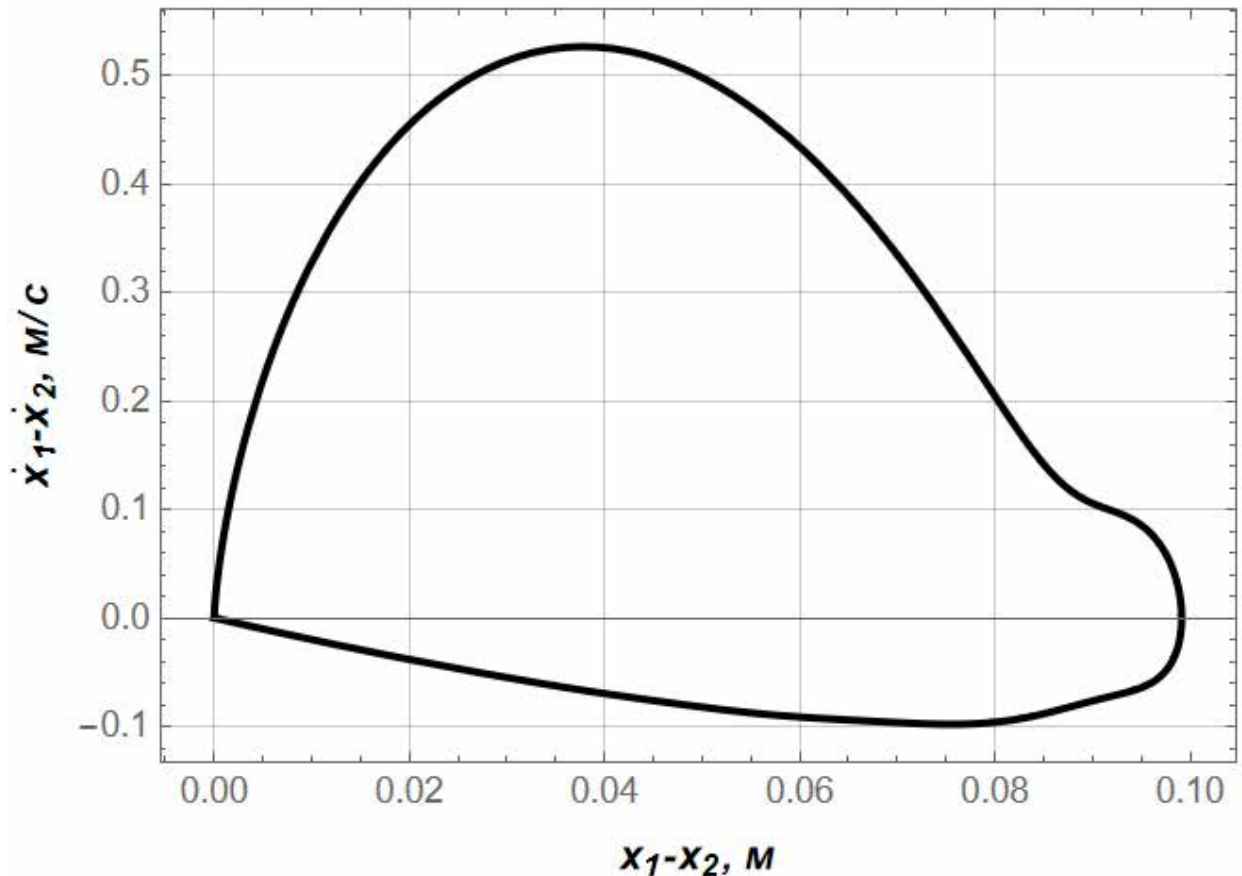


Рисунок 2.26 - Полярний графік різниці швидкості та положення

З графіку рисунка 2.26, робимо висновок про майже ідеальне регулювання з плавним виходом до бажаного положення та нульовим відхиленням в кінцевій точці. Тобто задачу виходу на задане положення повністю виконано!

З графіка 2.27 видно майже ідеальну криву зміни швидкості протягом регулювання. Звичайно. На початку відбувається стрибок, який сягає 0,535м/с, але потім за досить нетривалий термін спостерігаємо спад та плавний вихід на номінальну швидкість, яка досягається всього за 2 секунди регулювання.

Можна зробити висновок, що в такій конфігурації система поводить себе найбільш стабільним чином і відбувається плавний швидкий рух без перерегулювання.

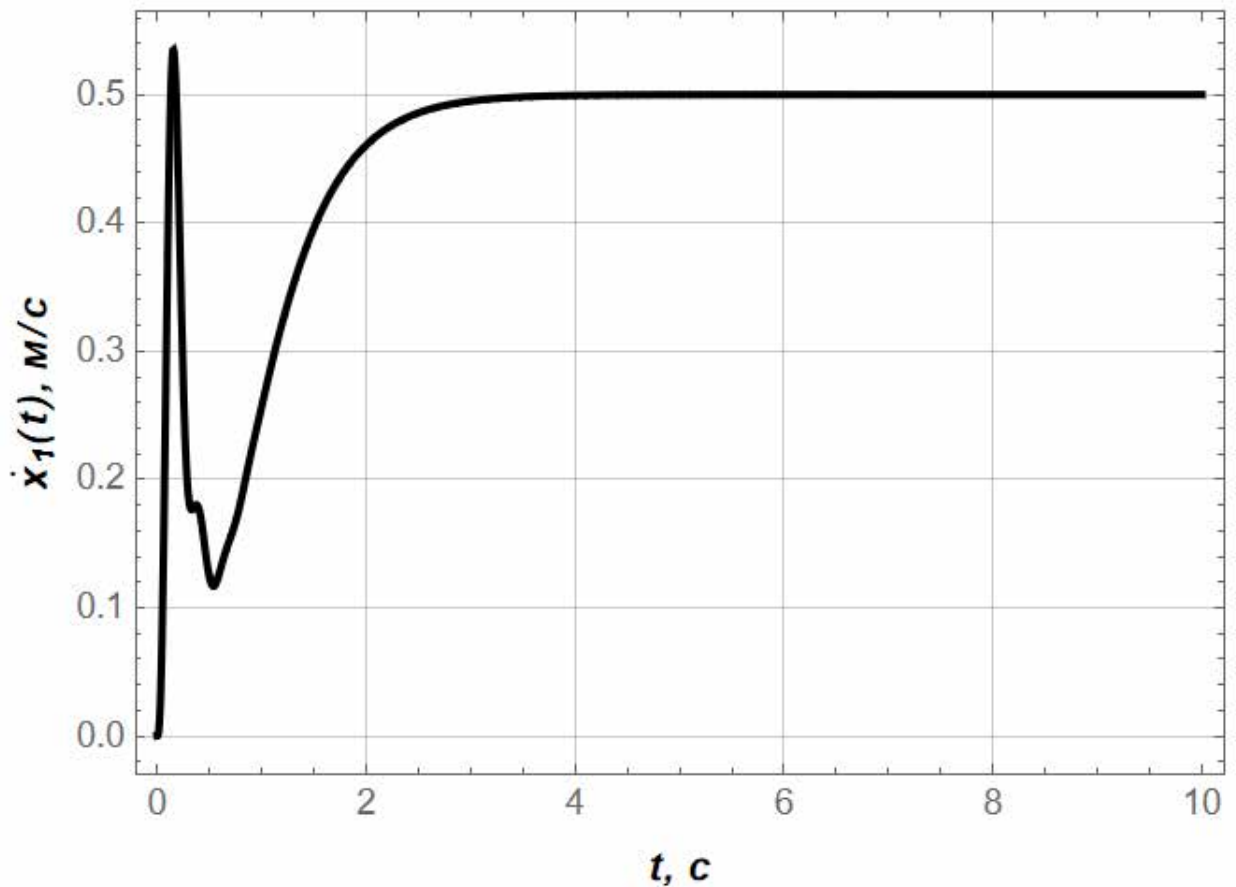


Рисунок 2.27 – Графіки зміни швидкості

2.3. Аналіз отриманих даних з чотирьох експериментів

Провівши чотири експерименти з налаштування оптимального LQR регулятора для системи керування зміною вильоту роботизованого баштового крану шляхом підбору вагових коефіцієнтів було визначено да розраховано деякий перелік статистичних даних. Ці дані дозволять більш наглядно переглянути результати синтезу оптимальної системи керування та порівняти за яких умов така система найкраще себе показує. В таблиці 2.1 наведено такі характеристики:

Таблиця 2.1 – Досліджувані характеристики при синтезі системи керування

Характеристика	Дослід №1 l = 12м, m = 20000	Дослід №2 l = 12м, m = 200	Дослід №3 l = 2м, m = 20000	Дослід №4 l = 2м, m = 200
Середньоквадратичне значення рушійного зусилля, Н	1719,72	67,9789	110,82	2981,26
Середньоквадратичне значення швидкості зміни рушійного зусилля, Н/с	1528,5	489,027	1529,8	4527,53
Середньоквадратичне значення пришвидшення зміни рушійного зусилля, Н/с ²	10996,1	33248,1	41650,9	12807,1
Середньоквадратичне значення потужності, Вт	395,508	21,2986	42,6508	913,191
Середньоквадратичне значення відхилення канату від вертикалі, м	0,105222	0,16194	0,162079	0,0302347
Максимальне значення рушійного зусилля, Н	4053,42	422,147	1047,79	9468,71
Максимальне значення швидкості зміни рушійного зусилля, Н/с	6563,27	6412,04	16031,9	15162
Максимальне значення пришвидшення зміни рушійного зусилля, Н/с ²	250960	3,16228·10 ⁶	1,00009·10 ⁶	100892

Продовження таблиці 2.1

Максимальне значення потужності, Вт	895,326	134,63	431,289	2871,93
Максимальне значення відхилення канату від вертикалі, м	0,248387	0,404437	0,40375	0,0957736

Детальну програму виконання алгоритму створення LQR регулятора для отримання оптимальної системи керування механізмом зміни вильоту баштового крану див. в додатках.

РОЗДІЛ 3

Розробка апаратної частини системи оптимального керування механізмом зміни вильоту роботизованого баштового крана

3.1. Розробка структурної схеми системи керування

Традиційний метод управління баштовим краном використовує двигуни змінного струму з послідовним опором для запуску та регулювання швидкості. Через тривалу роботу під великим навантаженням, часте перемикання передач вперед і назад може спричинити серйозні механічні та електричні пошкодження. [15]

VEICHI розробила рішення для баштових кранів із загальним двигуном змінного струму з короткозамкненим ротором, який є дешевшим, ніж двигун з дротяною обмоткою. Крім того, це значно зменшить деформацію сталеві конструкції, спричинену крутним моментом, і фундаментально вирішить проблему високого рівня відмов баштових кранів.

Перший в галузі інтегрований привід баштового крана, модель середнього та високого рівня, спеціально розроблена для модульного управління електричним керуванням баштового крана. Він інтегрує три основні механізми: блок керування частотним інвертором, блок логічного керування ПЛК і блок моніторингу «чорного ящика» (розширення). Рішення для баштового крана. Завдяки інтелектуальності, легкості, високій ефективності та енергозбереженню, безпеці та надійності, інтеграція баштового крана зі спеціальним інвертором стане новою тенденцією майбутнього розвитку галузі.

Сумісність з точним позиціонуванням за допомогою GPS і супутників Beidou, запис в реальному часі стану роботи баштового крана, часу перевантаження і даних в реальному часі, локальне зберігання і завантаження на платформу ІОТ одночасно.



Рисунок 3.1 – Компоненти електричної шафи баштового крана

Блок управління підйомом[15]:

1. Приймає векторне управління відкритим контуром, векторне управління замкнутим контуром та режим управління V / F.

2. Здатний працювати тривалий час, гальмувати на нульовій швидкості та плавно працювати без трясіння. Використання серії QT подовжує термін служби компонентів баштового крана, таких як трансмісійний механізм, сталевий канат та інші деталі. Тим часом це ефективно підвищує безпеку баштового крана.

3. Сильна пристосованість до електромережі: при низькій напрузі він може підтримувати постійний вихідний крутний момент.

4. Підвищена ефективність роботи: автоматичний запуск високошвидкісного стану, коли кран знаходиться в легкому навантаженні.

5. Розроблений зі спеціальним контролем часу гальмівної логіки та подвійним резервним контролем гальм, він є більш безпечним та надійним.

6. У режимі замкнутого циклу він має функцію захисту від зупинки, функцію нульового зависання сервоприводу та допоміжний захист гака проти ковзання, завдяки чому баштовий кран працює з підвищеною надійністю.

Блок управління поворотом

1. Інвертор баштового крана QT02 використовує гнучке управління крутним моментом, що забезпечує потужний ривок, швидку реакцію, стабільну роботу без відскоку.

2. Він може адаптуватися до різних типів управління двигуном, таких як жорстке з'єднання вихрового двигуна, м'яке з'єднання рідинної муфти та жорстке з'єднання крутного моменту.

3. Вбудований вихровий контролер використовує широтно-імпульсну модуляцію ШІМ, завдяки чому він може регулювати вихідну напругу в режимі реального часу відповідно до робочої частоти. У порівнянні зі звичайним вихроstromовим регулятором напруги, він має більш видатні характеристики.

4. Це змушує передачу перетворюватися стабільно і плавно без явища паузи.

Відбійний блок

Розроблений з функцією захисту від розгойдування, що полегшує зачеплення.

Пульт дистанційного керування ІОТ

1. За допомогою модуля дистанційного моніторингу можна досягти онлайн-моніторингу та дистанційної діагностики несправностей.

2. Віддалено контролюйте баштовий кран, щоб перевірити, чи не має він надмірної ваги, незаконно експлуатується тощо, щоб запобігти нещасним випадкам.



Рисунок 3.2 – Інтерфейс програмного забезпечення до баштового крану з показниками усіх датчиків

На рисунку 3.3 показано принципову схему [16] крана і те, як він генерує вхідний сигнал керування. Сигнали, що подаються оператором, надходять від пульта керування до блоків управління талі та візком. Програмований логічний контролер (ПЛК) Siemens виконує алгоритм формування вхідного сигналу. Потім отримані команди надсилаються на двигуни візка та/або моста. Ці приводи використовують вхідні команди від ПЛК як уставки швидкості для двигунів. Щоб забезпечити точне виконання команд, приводи є інверторами змінного струму серії Siemens Masterdrives. Цей тип приводів використовує широтно-імпульсний модульований сигнал для точного керування двигунами.

Для забезпечення хорошої сумісності з приводами були обрані двигуни, здатні працювати в інверторному режимі.

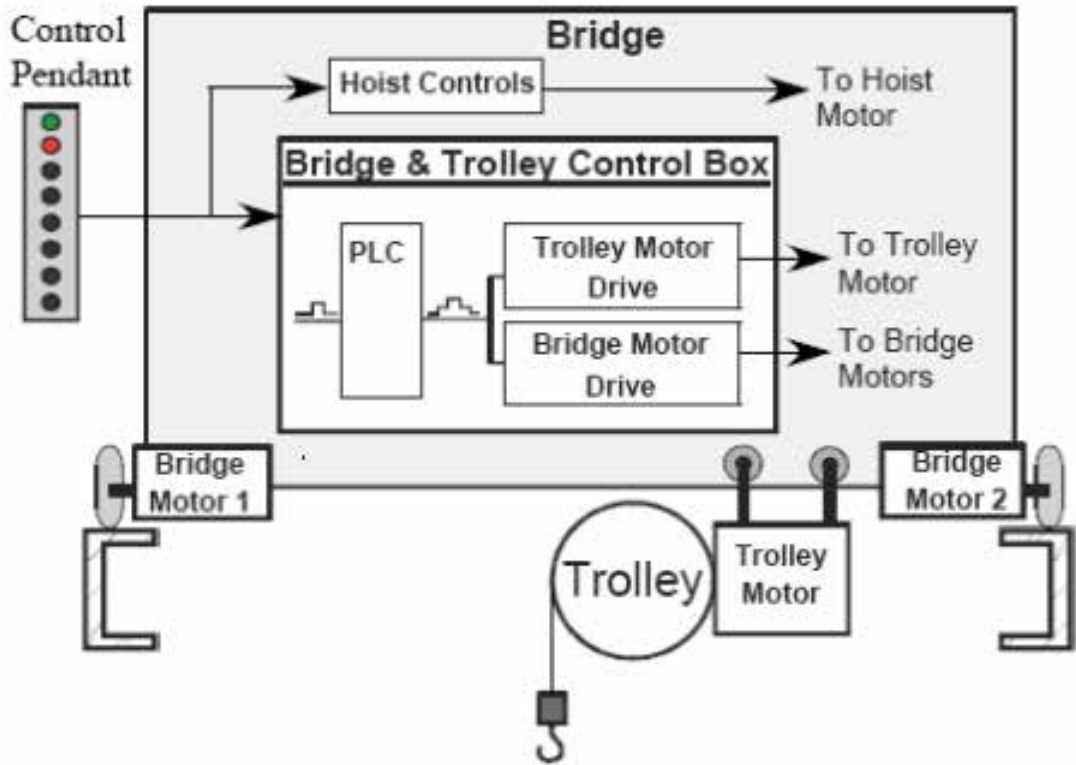


Рисунок 3.3 – Апаратна реалізація

Блок-схема контролера [16] на рисунку 3.4 містить формувач вхідного сигналу, розміщений у контурі зворотного зв'язку з позиціонуванням. Додатковий контур відхилення збурень взаємодіє з контуром позиціонування.

Завдяки такій комбінованій архітектурі керування досягається точне позиціонування корисного вантажу, а коливання, викликані рухом, і коливання, викликані збуреннями, усуваються.

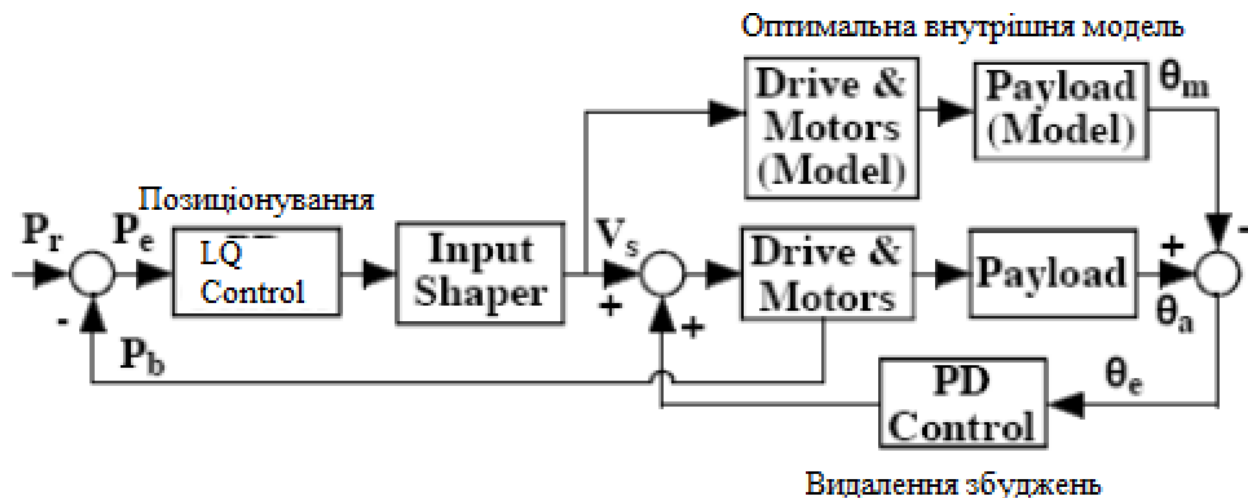


Рисунок 3.4 – Структурна схема оптимальної системи керування

Можливість точного позиціонування корисного навантаження досягається за допомогою контуру керування формуванням і позиціонуванням вхідного сигналу. Ця частина контролера генерує сформовану опорну швидкість, яка використовується як вхідний сигнал для компонента відсікання завад.

Модуль отримує сформований сигнал V_s і відстежує його, одночасно відкидаючи збурення. Оскільки V_s постійно спрямовує кран у потрібне положення, модуль відсікання збурень досягає подвійної мети - позиціонування та відсікання збурень. Крім того, оскільки V_s є командою у формі вхідного сигналу, коливання корисного вантажу, викликані рухом, будуть зменшені. Таким чином, контролер усуває коливання, викликані рухом, відкидає збурення і забезпечує точне позиціонування.

Тому, структурну схему системи оптимального керування механізмом зміни вильоту роботизованого баштового крану можна представити у наступному вигляді:

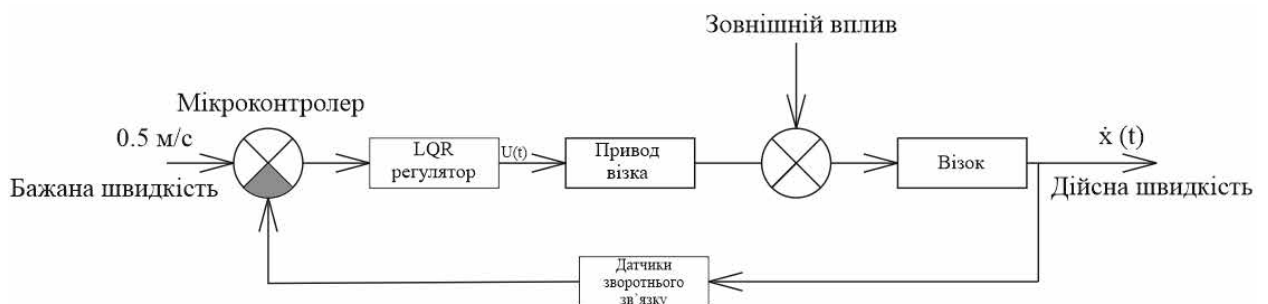


Рисунок 3.5 – Структурна схема оптимальної системи керування

3.2. Розробка рекомендацій стосовно апаратної частини системи

Електрообладнання баштових кранів класифікується [17] за призначенням і поділяється на два типи: допоміжне та основне. За важливістю вони практично рівні, оскільки кожна деталь виконує свою функцію.

До основного електрообладнання баштового крана більшість фахівців відносять: різні пристрої для управління електродвигунами (зокрема, командні

контролери, реле управління, контролери, контактори, пристрої електрозахисту, магнітні пускачі, захисні панелі, теплові реле, автоматичні вимикачі, запобіжники, обмежувачі навантаження і т.д.) і самі електродвигуни. Детальніше про ці пристрої ви можете дізнатися у фахівців.

До допоміжного електрообладнання баштових кранів відносяться елементи, що забезпечують обігрів і освітлення для роботи і ремонту.

Що стосується заміни, а також грамотного монтажу цих механізмів, то з цим ви можете звернутися до нас. При необхідності наші майстри проведуть монтаж баштового крана і всіх його комплектуючих, а також зможуть провести ревізію і ремонт його окремих елементів.

Система запобігання зіткненням [18] баштових кранів i4508 RaycoWylie використовує новітні технології та передові інновації, щоб допомогти запобігти зіткненням кранів на будівельному майданчику (кран з краном і кран з конструкцією).

Працюючи з галузевими експертами, компанія RaycoWylie створила одну з найпростіших, найбільш детальних і універсальних систем запобігання зіткненням на ринку, яка розроблена таким чином, щоб бути інтуїтивно зрозумілою для використання як оператором, так і монтажником.

Система може одночасно контролювати до двадцяти одного крана на будівельному майданчику, а також перешкоди на майданчику та заборонені робочі зони.

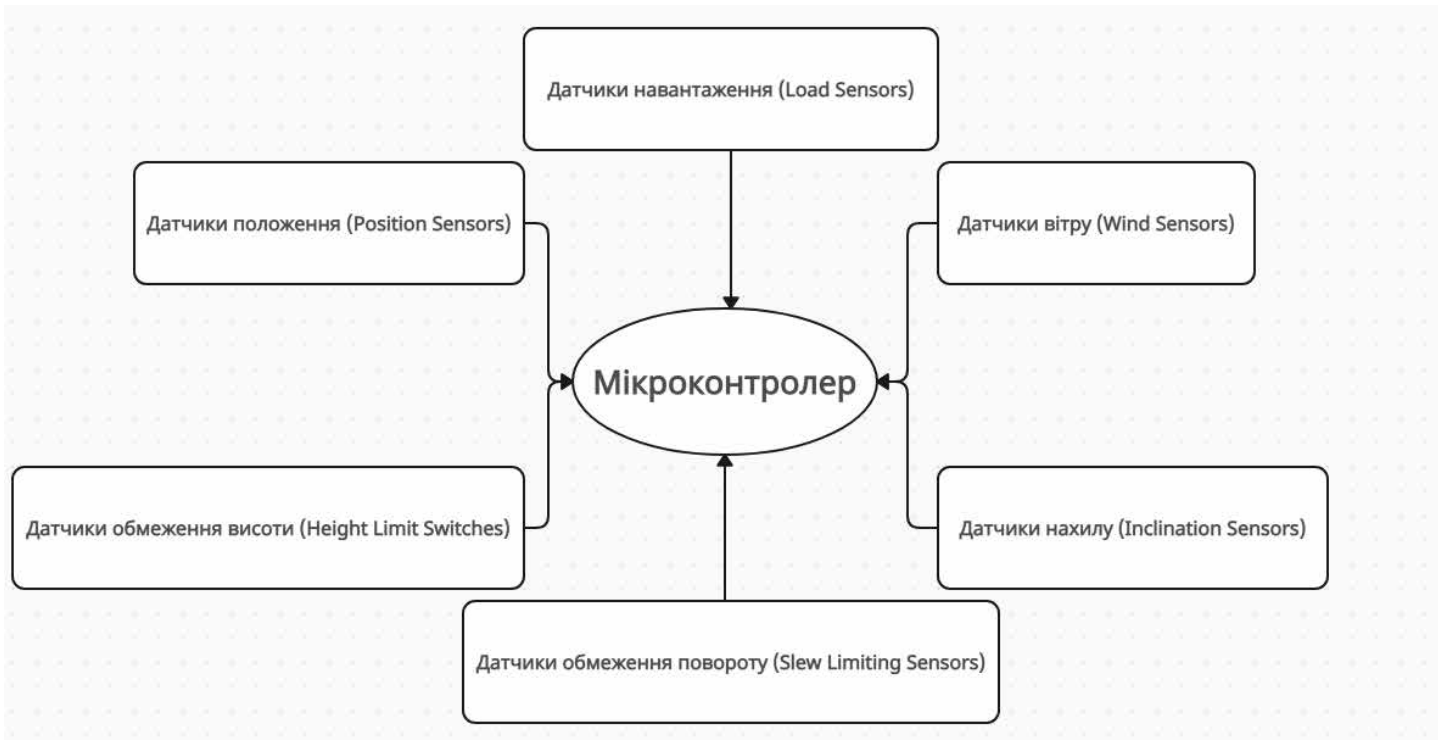


Рисунок 3.6 – Структурна схема взаємодії датчиків роботизованого баштового крану з мікроконтролером

Датчики навантаження призначені для вимірювання ваги вантажу, що піднімається краном, для запобігання перевантаженню та забезпечення стабільності. До прикладів таких датчиків можна навести: SENSY – Модель 5350, 5300 (бельгійський виробник); LOAD CELL SYSTEMS – Моделі для підвісу гаків, рами, з телекомунікацією в реальному часі. Crane Electronics Ltd - TorqueStar

Датчики навантаження (тензорезистори) використовують зміну опору на тензорезисторах під дією ваги. Ці значення оцифровуються і передаються на контролер.

Датчики положення займаються визначенням положення стріли крана, гака або висоти вантажу для точного керування рухом. Прикладами таких датчиків є: SICK – модель AHS/AHM36 (Німеччина); Pepperl+Fuchs – прецизійні енкодери серії RVI58

В таких датчиках використовують інкрементні або абсолютні енкодери, які відстежують обертання механізмів крана, перетворюючи його в цифровий сигнал положення.

Датчики вітру необхідні для контролювання швидкості та напрямку вітру, що дозволяє забезпечити безпеку переміщення великих вантажів. Такими датчиками є: Gill Instruments – модель WindObserver II (Великобританія); Vaisala – модель WXT530 (Фінляндія).



Рисунок 3.7 – Датчик швидкості вітру WFS-1 для баштового крана

Кінцеві вимикачі висоти призначені для обмеження висоти підйому гака для запобігання небезпечних ситуацій.

Такими обмежувачами є: Telemecanique Sensors – серія ХСКJ (Франція); Honeywell – серія MICRO SWITCH для важких умов

Датчики нахилу потрібні для контролювання кута нахилу крана щоб запобігати можливому його перекиданню.

Приклади таких датчиків: IFM Electronics – серія JDG/N (Німеччина); TE Connectivity – датчики нахилу серії 7305A.

Принцип роботи: Акселерометри або гіроскопи використовують для визначення кута нахилу, забезпечуючи миттєвий зворотний зв'язок з контролером.

Датчики обмеження повороту використовують щоб обмежувати кут повороту крана задля уникнення здійснення небезпечних маневрів. До конкретних прикладів цих датчиків можна навести: PAT Kruger – MBR 3000 (Німеччина); Rayco-Wylie – серія RCI-2950.



Рисунок 3.8 - Датчик кута JDC-100-L / R для баштового крана

Принцип дії цих датчиків базується на тому, що індукційні або оптичні датчики посилають сигнал на контролер, якщо встановлений граничний кут.

Всі перелічені вище датчики [19] передають сигнали на контролер крана, який аналізує ці дані та видає команди базуючись на заданих параметрах і налаштуваннях. Контролери зазвичай працюють з цифровими і аналоговими сигналами. Основними типами контролерів для баштових кранів є PLC контролери (програмовані логічні контролери). Виробниками таких контролерів є: Siemens (серія S7), Allen-Bradley (MicroLogix, CompactLogix) та ін. Особливостями цих мікроконтролерів є забезпечення гнучкості програмування, можливість підключення різноманітних датчиків і легке інтегрування в систему автоматизації.

Спеціалізованими виробниками кранових контролерів можна назвати PAT Kruger – Trimble (LOADRITE) – Серія DS350 – Особливості систем LMI: Розроблені спеціально для кранів, інтегруються з різними типами датчиків і забезпечують функціональність, включаючи захист від перевантаження.



Рисунок 3.9 – ПЛК S7-200CN 6ES7 216-2BD23-0XA8 PLC для баштового крана



Рисунок 3.10 – Програмований контролер Fuji PLC NW0P60R-31ZSPE

РОЗДІЛ 4

Розрахунок економічної ефективності розробленої оптимальної системи керування

4.1 Фактори, які впливають на підвищення ефективності виконання технологічних операцій

На ефективність роботи баштових кранів мають вплив безліч факторів, велику кількість з яких неможливо наперед спрогнозувати. Але, для досягнення кращої ефективності виконання технологічних операцій можна максимально оптимізувати ті складові, на які маємо можливість впливу.

В цілому, можна навести такі фактори, які мають вплив на ефективність роботи баштового крана: кваліфікація персоналу; технічний стан крана; оптимізація логістики; погодні умови; габарити крана; характеристики приводних механізмів та ефективне використання ними електроенергії.

Більшість досліджень щодо плану зміни вильоту баштового крана ґрунтується [20] на виборі оптимального обладнання, місця розташування та планів монтажу баштового крана[21]. Для того, щоб оцінити ефективний час виконання існуючих вантажопідйомних робіт баштовими кранами, Lee J. R. визначив фактори, які не були враховані при оцінці часу виконання існуючих вантажопідйомних операцій. На основі цих результатів для прогнозування часу, необхідного для роботи баштового крана, був використаний множинний регресійний аналіз. Крім того, Lee J. H., використовуючи технологію GPS, провів аналіз умов роботи баштового крана, необхідних для будівництва, і часу, витраченого на вантажопідйомні роботи. Однак дослідження щодо шляхів ефективного використання баштових кранів у будівництві не проводилися.

В своїй бакалаврській кваліфікаційній роботі мною було описано покращення приводу механізму зміни вильоту баштового крана, що дозволить збільшити його ефективність. В цій же роботі пропонується використання оптимальної системи керування, яка в своїй основі має налаштований LQR

регулятор, що дозволяє зменшити час, необхідний для виконання бажаних переміщень візка та, як наслідок, вантажу.

Важливо розуміти, що хоча переважаюча більшість сучасних баштових кранів вже обладнана великою кількістю навісного обладнання, таких як датчики повороту, датчики швидкості вітру, датчики положення та ін. Все одно може бути необхідність дообладнання крану потрібними складовими, що дозволять в повній мірі реалізувати запропоновану систему керування.

Впровадження оптимальної системи керування механізмом зміни вильоту баштового крану дозволяє повністю виключити негативний людський фактор на динаміку керування, збільшити швидкість переміщення вантажу, розгін до номінальної швидкості, зменшити коливання, підвищити точність та безпеку на місці робіт.

4.2 Економічна доцільність покращення

Економічне обґрунтування розробки оптимальної системи керування, розрахунок економічного ефекту від використання оптимальних законів керування кранами, а також обґрунтоване економічне використання керування вантажопідійомних машин з використанням частотних перетворювачів наведено у роботах [22][23].

В першу чергу, використання оптимальної системи керування дозволяє зменшити робочий час крану, що в свою чергу веде до зменшення витрат на електроенергію та оплату робочого часу персоналу.

Зручніше всього буде оперувати величиною продуктивності [24] крану, яка розраховується наступним чином:

$$P_z = Q_0 \cdot n = Q_0 \frac{3600}{T_{\text{ц}}}; \quad (4.1)$$

де Q_0 – маса вантажу, т; n – число циклів за годину ; $n = 3600 / T_{\text{ц}}$; $T_{\text{ц}}$ – тривалість циклу, с.

Тривалість робочого циклу крана при перевантажувальних роботах може бути визначена за виразом:

$$T_{\text{ц}} = \sum t + \sum t_{\text{д}}; \quad (4.2)$$

де $\sum t$ – час, що витрачається на операції по переміщенню вантажу краном; $\sum t_{\text{д}}$ – сумарний час, виконання допоміжних операцій, який знаходиться за формулою:

$$\sum t_{\text{д}} = t_{\text{зах}} + t_{\text{зн}} + t_{\text{нав}} + t_{\text{засп}}; \quad (4.3)$$

де $t_{\text{зах}}$ – час, затрачений на стропування, або захват вантажу; $t_{\text{зн}}$ – час, затрачений на відчеплення вантажу; $t_{\text{нав}}$ – час, затрачений на позиціонування вантажу; $t_{\text{засп}}$ – час, що затрачений на заспокоєння коливань вантажу.

За таким алгоритмом пораховано тривалість робочого циклу при ручному та з використанням оптимального керування механізмом зміни вильоту.

Час підйому та опускання вантажу, час повороту залишається незмінним як при ручному так і оптимальному керуванні, адже описується саме система для зміни вильоту баштового крану.

Тому, користуючись еспериментальними даними, що наведені в статті [1], прийmemo час підйому та опускання вантажу рівним:

$$T_{\text{нід}} = \frac{2H}{V_{\text{нід}}} + t_{\text{п}}, \quad (4.4)$$

де H - середня висота підйому вантажу; V - середня швидкість підйому; $t_{\text{п}}$ - тривалість розгону і гальмування механізму.

$$T_{\text{нід}} = \frac{2 \cdot 60}{0,8} + 4 = 154 \text{сек}$$

Час повороту визначимо так:

$$T_{\text{пов}} = \frac{2\zeta}{360n} + t_{\text{п}}, \quad (4.5)$$

де ζ - середній кут повороту крана; n - частота обертання крана; t_{π} - тривалість розгону і гальмування механізму.

$$T_{\text{пов}} = \frac{2 \cdot 85}{360 \cdot 0,015} + 4 = 31,48 \text{сек}$$

А от час, що витрачається на зміну вильоту буде відрізнятися для випадків ручного та автоматичного керування. Він розраховується наступним чином:

$$T_{\text{вил}} = \frac{2S}{V} + t_{\pi}, \quad (4.6)$$

де S - середня відстань зміни вильоту V - середня швидкість зміни вильоту t_{π} - тривалість розгону і гальмування механізму.

Тоді при ручному керуванні:

$$T_{\text{вил}} = \frac{2 \cdot 7}{0,39} + 5 = 40,89 \text{сек}$$

При використанні оптимального регулятора:

$$T_{\text{вил}} = \frac{2 \cdot 7}{0,43} + 4 = 36,56 \text{сек}$$

Тоді отримаємо такий час операцій крана з використанням ручного керування системою зміни вильоту:

$$\sum t = 154 + 31,48 + 40,89 = 226,37 \text{с}$$

А при використанні оптимального керування:

$$\sum t = 154 + 31,48 + 36,56 = 222,04 \text{с}$$

Тривалість же допоміжних операцій при ручному керуванні складатиме:

$$\sum t_{\text{д}} = 48 + 41 + 8 + 12 = 109 \text{с}$$

А з використанням оптимальної системи керування механізму зміни вильоту:

$$\sum t_{\text{д}} = 48 + 41 + 4 + 0 = 93 \text{с}$$

Остаточно розраховуємо тривалість робочого циклу крану при ручному керуванні:

$$T_{\text{ц}} = 226,37 + 109 = 335,37\text{с}$$

Та з використанням оптимального регулятора:

$$T_{\text{ц}} = 222,04 + 93 = 315,04\text{с}$$

Можна бачити, що різниця тривалості робочих циклів при ручному керуванні та з використанням оптимального регулятора для керування механізмом зміни вильоту баштового крану складає 20,33с, що є досить суттєвим числом.

Для більшої наочності розрахуємо годинну продуктивність крану для обох випадків:

$$P_{\text{г}} = 6 \cdot \left(\frac{3600}{335,37} \right) = 64,41 \text{ т/год}$$

$$P_{\text{г}} = 6 \cdot \left(\frac{3600}{315,04} \right) = 68,56 \text{ т/год}$$

Середньорічна експлуатаційна продуктивність визначається таким чином:

$$P_{\text{річ}} = P_{\text{г}} \cdot N_{\text{ргод}}, \quad (4.7)$$

де $N_{\text{ргод}}$ – кількість робочих годин протягом року.

Кількість робочих годин протягом року при восьмигодинній тривалості зміни:

$$N_{\text{ргод}} = 8 \cdot PД \cdot n_{\text{зм}} \cdot K_{\text{ГО}} = 8 \cdot 312 \cdot 2 \cdot 0,88 = 4392,96 \text{ год}; \quad (4.8)$$

де $PД = 312$ – кількість робочих днів протягом року; $n_{\text{зм}} = 2$ – кількість змін в добу; $K_{\text{ГО}} = 0,88$ – коефіцієнт який враховує наявність, протягом часу зміни, робочого часу для проведення технічного обслуговування, незначних ремонтів, тощо.

Звідси, середньорічна експлуатаційна продуктивність з ручним та оптимальним керуванням становить відповідно:

$$P_{річ} = 4392,96 \cdot 64,41 = 282950,554 \text{ т}$$

$$P_{річ} = 4392,96 \cdot 68,56 = 301181,338 \text{ т}$$

Річний економічний ефект від зменшення тривалості робіт визначимо за формулою:

$$E_{річ} = \frac{\Delta P_{річ}}{P_{г} \cdot N_{год}} \cdot K_{д} \quad (4.9)$$

де $P_{річ}$ – різниця середньорічних експлуатаційних продуктивностей відповідно при оптимальному та ручному керуванні; $N_{год}$ – кількість робочих годин крана за добу; $K_{д}$ – вартість оренди баштового крана за добу.

$$E_{річ} = \frac{301181,338 - 282950,554}{68,56 \cdot 16} \cdot 16000 = 265909,918 \text{ грн}$$

Як вже і було сказано у п.1 цього розділу, для використання такої автоматизованої системи можливо знадобиться встановити додаткове обладнання. Вартість такого обладнання та повна сума покращення будуть такими:

Датчик положення ~ 41500 грн

Датчик кута повороту ~ 12500 грн

Датчики швидкості та прискорення ~ 16500 грн

Датчик ваги ~ 24800 грн

Сумарно вартість покращення баштового крану для можливості використання розробленої системи оптимального керування механізмом зміни вильоту складає 95300 грн за умови відсутності цих датчиків на крані, що досить маловірогідно.

РОЗДІЛ 5

Охорона праці

5.1. Робота з кваліфікованими кадрами

При зведенні [25] одних з найвищих будівель у світі будівельні бригади покладаються на потужність і виліт баштового крана. Цей тип кранів відомий як стаціонарний кран, оскільки він нерухомий на будівельному майданчику. Завдяки своїм розмірам і потужності, баштовий кран зазвичай використовується для переміщення матеріалів по будівельному майданчику і там, куди інші крани не можуть дістатися.

Робота з баштовими кранами на будівельних майданчиках пов'язана з низкою небезпек. Неправильні методи роботи та неоптимізовані операції можуть призвести до серйозних і небезпечних для життя травм.

Крім того, проблеми з безпекою [26] баштових кранів можуть призвести до дорогого пошкодження будівель, обладнання та інших споруд.

Ось чому неможливо переоцінити важливість оцінки ризиків та обізнаності при роботі з баштовими кранами на будівельних майданчиках. Безпека використання баштових кранів є життєво важливою, оскільки вона допомагає запобігти нещасним випадкам і забезпечує безпеку на робочому місці під час виконання робіт.

У цьому розділі будуть розглянуті деякі заходи для уникнення найпоширеніших небезпек і пасток, пов'язаних з кранами, та забезпечення безпечного робочого середовища для керівників і робітників.

Інженери баштових кранів в основному відповідають за транспортування крана на будівельний майданчик, створення плану підйому та забезпечення всіх операторів баштових кранів необхідною інформацією для ефективної та безпечної експлуатації обладнання. Перед початком роботи з баштовим краном ці інженери також повинні враховувати різні аспекти, такі як:

1. Аналіз опорної поверхні
2. Конструкція підкранового настилу
3. Матеріали крана

4. Питання доступу
5. Розташування крана
6. Навантаження на виносні опори
7. Конструкції такелажу
8. Умови ґрунту
9. Висота башти
10. Конструкція основи
11. Анкерні болти
12. Швидкість і умови вітру

Керівники будівництва завжди повинні пам'ятати про те, що співпрацювати слід тільки з ліцензованими інженерами, які можуть спроектувати правильні умови роботи баштового крана, які підходять для виконання роботи. Всі перераховані вище фактори включаються в план баштового крана.

Будівельна галузь вважається однією з найнебезпечніших галузей, які загрожують життю персоналу на будівельному майданчику [27]. На будівельних майданчиках баштові крани в основному використовуються для вертикального і горизонтального транспортування матеріалів і монтажу. Аварія баштового крана часто призводить до серйозних наслідків. 26 липня 2023 року в Нью-Йорку впав кран, внаслідок чого постраждало 12 осіб, зокрема дев'ять цивільних осіб і троє пожежників (CNN). Вранці 16 листопада 2023 року на суднобудівному заводі в місті Сумото, префектура Хього, стався нещасний випадок, коли впала частина демонтованого крана, і двоє робітників-чоловіків, причетних до інциденту, залишилися в критичному стані, непритомні. Тому управління безпекою баштових кранів є особливо важливим.

5.2. Розробка планів з техніки безпеки

Роботи з використанням баштових кранів не можуть розпочинатися без робочих планів з техніки безпеки, розроблених для оцінки потенційних

небезпек і визначення заходів, які необхідно вжити для їх мінімізації або контролю.

Для кожної роботи баштового крана інженери повинні розробити оцінку ризиків або план безпеки, який буде розглянутий керівником будівельного майданчика.

Ці питання розглядаються під час тренінгу/наради з техніки безпеки перед початком будівництва, на якому підрядник визначає очікування від проекту щодо безпеки, ефективності та продуктивності баштового крана.

Після того, як підрядники розглянуть план, він повинен бути підтверджений екіпажем (включаючи робітників та операторів баштових кранів) шляхом підписання плану та усного повідомлення про те, що вони його розуміють.



Рисунок 5.1 – Табличка із застереженням не знаходитись під вантажем

Якщо баштовий кран повністю не вимкнений і на його гаку не підвішені вантажі, працівники будівельного майданчика ніколи не повинні залишати кран без нагляду.

Якщо оператор крана повинен бути присутнім при ліквідації аварійної ситуації або інших будівельних роботах, він повинен спочатку належним чином зупинити кран, застосувавши гальма та запобіжні засоби блокування баштового крана.

Оператор також повинен відтягнути гак у верхнє робоче положення при вимкненому електроживленні.

Цей протокол є критично важливим для всіх типів кранів, включаючи мобільні та гусеничні крани, для забезпечення безпеки на будівельному майданчику. Належні процедури вимкнення запобігають нещасним випадкам і підтримують безпечне середовище для всіх працівників на будівельному майданчику.



Рисунок 5.2 – Табличка із застереженням про роботу крану

Всі органи управління повинні бути розташовані в межах легкої досяжності для оператора і залишати йому достатньо місця для роботи. Елементи керування повинні бути з блокуванням, тобто автоматично повертатися в нейтральне положення, коли їх відпускають. Головний вимикач живлення повинен бути заблокований і знаходитися в межах легкої досяжності оператора. Кожен елемент управління повинен бути чітко позначений і промаркований, щоб показати рух і напрямок руху, який він контролює. Там, де це практично можливо, органи управління повинні бути розташовані таким чином, щоб запобігти випадковому зміщенню і ненавмисному натисканню на них, що не призводить до приведення крана в рух.

Усі відкриті рухомі частини баштового крана, такі як шестерні, шківни, ремені, ланцюги, вали, маховики тощо, які можуть становити небезпеку за нормальних умов експлуатації, повинні бути ефективно захищені.

Всі баштові крани будь-якої конфігурації повинні бути обладнані вбудованими пристроями безпеки, які спрацьовують автоматично, щоб запобігти пошкодженню машини в разі помилки оператора. Найважливішими з них є кінцеві вимикачі, які виключають можливість перевантаження крана або надмірного переміщення компонентів крана. Кожен баштовий кран повинен мати: кінцевий вимикач висоти гака, який зупиняє барабан, коли вантажний гак досягає заданого положення максимальної висоти; кінцеві вимикачі вильоту стріли, які зупиняють барабан, коли стріла піднімається на занадто великий кут або опускається на занадто малий кут. Ці вимикачі слід регулювати, повільно піднімаючи і опускаючи стрілу (без вантажу) і дозволяючи їй контактувати з ударними вимикачами; кінцевий вимикач руху візка, який зупиняє рух візка, коли він досягає заданого максимального положення; кінцевий вимикач перевантаження, який зупиняє барабан підйомного пристрою, коли вантаж, що піднімається, перевищує максимальне номінальне навантаження для будь-якого радіусу або кута нахилу стріли, або коли момент перекидання перевищує номінальний момент навантаження. Кінцевий вимикач перевантаження повинен бути встановлений разом з автоматичним індикатором безпечного навантаження; і кінцеві вимикачі пересування для рейкових кранів, які застосовують гальмо каретки, коли кран наближається до кінців колії.

5.3. Технічне обслуговування

Технічне обслуговування та огляд баштового крана необхідно проводити регулярно, щоб забезпечити його відповідність нормам безпеки на робочому місці. Призначений інспектор повинен спочатку оцінити всі компоненти крана, щоб запобігти механічним пошкодженням і визначити деталі, які потребують ремонту, модифікації або заміни.

Перед початком роботи баштового крана керівники будівельного майданчика повинні також найняти незалежну фірму для оцінки планів і розрахунків інженера з безпеки.

Інженер також повинен проводити періодичні перевірки монтажу баштового крана, а також операцій з підйому, стрибків і такелажу. Це робиться для того, щоб переконатися, що баштовий кран відповідає затвердженим планам безпеки.

Крім щотижневого повного огляду компетентною особою, огляд і технічне обслуговування баштового крана (баштових кранів) повинні проводитися не рідше одного разу на місяць технічним персоналом з огляду і технічного обслуговування баштових кранів.

Технічний персонал з огляду та технічного обслуговування повинен належним чином реєструвати всю виконану роботу та відповідні висновки. Записи повинні бути прочитані та підписані технічним(и) персоналом(ами) з огляду та технічного обслуговування. Протокол огляду і технічного обслуговування повинен містити таку інформацію, якщо це можливо: основна інформація, така як модель крана, дата огляду, номер робочого місця, адреса робочого місця, власник крана, швидкість вітру, час роботи крана і напруга живлення крана повинні бути зареєстровані в журналі; деталі виконаних робіт з огляду, технічного обслуговування і ремонту повинні бути зареєстровані в журналі з деталями стану перевірених частин і того, чи було застосовано мастило.

Якщо ремонтні роботи вимагаються або були проведені, деталі повинні бути внесені в журнал; роботи з огляду, технічного обслуговування і ремонту, проведені на критичних механізмах баштового крана, включаючи, але не обмежуючись, якщо це застосовно: вантажопідйомні операції баштового крана, такі як: перевірка та регулювання (за необхідності) гальмівної системи підйому, допоміжної гідравлічної гальмівної системи, кінцевого вимикача висоти гака, вимикача моменту та вимикача перевантаження; перевірка електричних частин системи підйому, рівня масла в редукторі та його дозаправка, лебідки та головної осі, змащування та мастило фіксація основи для вантажопідйомних частин, з'єднувальних штифтів/болтів редуктора і опор; перевірка з'єднань всіх шківів, гаків і штифтів; перевірка змащення, стану зносу канатів; перевірка

поворотного/протизакручувального пристрою для канатів на стрілі; перевірка запобіжних засувок всіх гаків;

Перевірка роботи вильоту баштового крана, а саме: перевірка та регулювання гідравлічної гальмівної системи, кінцевого вимикача вильоту та кінцевого вимикача вильоту візка; перевірка електричних частин для вильоту; фіксація частин вильоту, болтів та гайок штифтів; перевірка стану змащення та зносу шківів візка; перевірка стану змащення та зносу дротяних канатів; та обмежувачів стріли.

Поворотні частини, такі як: перевірка та регулювання кінцевих вимикачів повороту; перевірка електричних частин для повороту; перевірка та закріплення клинового ременя на поворотному двигуні; перевірка рівня масла в поворотному редукторі та дозаправка; перевірка та фіксація болтів поворотного підшипника; змащення поворотного підшипника мастилом; змащення поворотного кільця мастилом; і фіксація з'єднувальних штифтів / болтів для редуктора;

Сталева конструкція та основні конструктивні частини, такі як: перевірка основи вежі та основи щогли; перевірка з'єднань усіх секцій щогли, перевірка відсутності шплінтів / болтів та гайок; перевірка з'єднань та шплінтів на стрілі та інших сталевих конструкційних частинах / болтів та гайок; перевірка зварювальних швів усіх структурних компонентів, таких як секції щогли, поворотне кільце, стяжний брус та фундаментний якір тощо; перевірка відсутності деформацій у місцях з'єднання секцій щогли перевірка на наявність будь-яких деформацій секцій щогли, стріли та контрстріли (вертикальних частин та стяжок); перевірка з'єднань хомутів для підйому (або стінових стяжок); перевірка штифтів та болтів баластних блоків; та перевірка підйомних сходів баштового крану.

5.4. Врахування погодних умов

Несподівані погодні умови можуть значно ускладнити роботу баштових кранів.

Навіть якщо перевірка крана не виявила жодних проблем з його безпекою та функціональністю, оператори не можуть ігнорувати вплив погодних умов.

Більшість сучасних кабін кранівників обладнані індикаторами швидкості вітру, які повідомляють операторам про поточну швидкість і умови вітру. Ця функція також повинна використовуватися для визначення вітрових навантажень баштового крана, щоб запобігти нахилу або перекиданню баштового крана.



Рисунок 5.3 – Перелік датчиків, які допомагають уникати небезпечних ситуацій при експлуатації баштових кранів

Виробники баштових кранів можуть підготувати графіки навантажень, але вони не враховують можливі вітрові умови, що впливають на безпеку баштового крана.

З огляду на це, оператори повинні бути особливо обережними при швидкості вітру від 0 до 32 км/год, зменшуючи навантаження, що переноситься баштовим краном.

При більш високих швидкостях (понад 65 км/год) оператор повинен стягнути стрілу або взагалі припинити роботу крана.

Крани не повинні експлуатуватися за погодних умов, які можуть поставити під загрозу їхню стійкість. Перед введенням крана в експлуатацію після перебування в погодних умовах, які могли вплинути на стійкість крана, його кріплення або баласт повинні бути перевірені компетентним експертом (Правило 7G LALGR).

Необхідно суворо дотримуватися будь-яких інструкцій, виданих виробниками кранів, що рекомендують умови, за яких кран слід виводити з експлуатації, і умови, в яких його слід поставити на зберігання. Під час несприятливих погодних умов, таких як злива і блискавка, слід вжити відповідних заходів для запобігання небезпеці для персоналу, пов'язаного з використанням крана.

Крани, як правило, призначені для роботи в умовах нормальної постійної швидкості вітру і не повинні експлуатуватися при швидкості вітру, що перевищує зазначену в інструкції з експлуатації крана. Поривчастий вітер може негативно вплинути на безпечне робоче навантаження і стійкість машини. Навіть при відносно слабкому вітрі слід уникати переміщення вантажів з великою вітрозахоплюючою поверхнею. Вивіски або інші предмети, що створюють вітрозахоплюючу поверхню, не повинні встановлюватися на стрілі, контрстрілі або башті баштового крана без прямого дозволу виробника.

На всіх баштових кранах на відповідній висоті повинен бути встановлений анемометр або пристрій для вимірювання швидкості вітру.

5.5. Ідентифікація

Для ідентифікації кран повинен мати постійну довговічну табличку із зазначенням назви виробника, моделі машини, серійного номера, року випуску та ваги агрегату.

Кожен основний структурний, електричний і механічний компонент машини повинен мати постійну довговічну табличку / чітку вказівку з назвою виробника, номером моделі машини, серійним номером, роком першого продажу виробником і вагою одиниці. Крім того, ідентифікаційні номери повинні бути чітко позначені на всіх основних знімних компонентах і пристосуваннях машини (таких як противаги тощо), щоб показати, що вони належать до цієї машини. Важливо, щоб ці компоненти використовувалися тільки на цій машині або на ідентичних моделях чи обладнанні, для яких вони були спеціально призначені виробником.

5.6. Огляд технічного стану з допомогою БПЛА

Під час огляду баштових кранів [2728] часто виникають такі проблеми, як висока швидкість вітру, велика висота підйому та неповне покриття. Для вирішення цих проблем використовується технологія позиціонування RTK за допомогою БПЛА.

RTK – це диференціальний метод обробки в реальному часі спостережень фази несучої з двох вимірювальних станцій, який може забезпечити позиціонування на сантиметровому або навіть міліметровому рівні. На основі технології позиціонування RTK БПЛА може точно літати по заданих траєкторіях, уникаючи відхилень і трясіння, і отримувати чіткі та стабільні зображення баштових кранів. Захоплюючи зображення різних компонентів баштового крана, можна виявити приховані небезпеки баштового крана.

При проектуванні інтелектуальної системи інспекції для безпілотних літальних апаратів необхідно планувати маршрут, напрямок польоту і положення зависання, оскільки вони безпосередньо визначають обсяг і якість інспекції баштового крана. Баштовий кран в основному складається з вертикальної конструкції (стандартна секція корпусу башти, підйомно-

поворотний пристрій, оголовок башти) і горизонтальної конструкції (підйомний кронштейн, балансир, кріплення тощо). На прикладі стандартної секції корпусу башти на рисунку 1 показано схему маршруту огляду вертикальної конструкції баштового крана.

Існує два маршрути польоту. Перший – це круговий маршрут польоту, як показано на рисунку 1а. БПЛА спочатку облітає стандартну секцію в горизонтальному напрямку, потім піднімається вертикально до стандартної секції вище, а потім робить наступне коло. Ці дії повторюються доти, доки не будуть покриті всі стандартні ділянки.

Інший варіант – Z-подібний маршрут польоту, як показано на рисунку 1б. БПЛА піднімається вертикально вздовж головної гілки стандартних секцій до вершини. Потім він летить горизонтально до сусідньої головної гілки і вертикально спускається. У порівнянні з Z-подібним маршрутом польоту підйомника, круговий маршрут забезпечує більш детальний огляд опорних балок стандартних секцій, але він передбачає довшу траєкторію польоту і нижчу ефективність.

Крім того, існує ймовірність того, що в процесі огляду дрон може наблизитися до підйомного пристрою занадто близько, що призведе до спрацьовування датчиків ухилення від перешкод або зіткнення з ним, що може призвести до дострокового припинення польоту. Обидва маршрути польоту можна гнучко вибирати, виходячи з фактичного розташування баштового крана і навколишнього середовища.

На рисунку 5.4 показано схему маршруту подібної горизонтальної конструкції на прикладі підйомної стріли. З рисунка 5.4 видно, що БПЛА може пролітати вздовж напрямку стріли, а інтервал зйомки або відстань зйомки можна встановити відповідно до фактичних вимог до огляду. Загалом, основним принципом проектування маршруту польоту є оптимізація траєкторії польоту відповідно до вимог інспекції та максимальне охоплення конструкції баштового крана, забезпечення безпеки польоту БПЛА та підвищення ефективності виявлення.

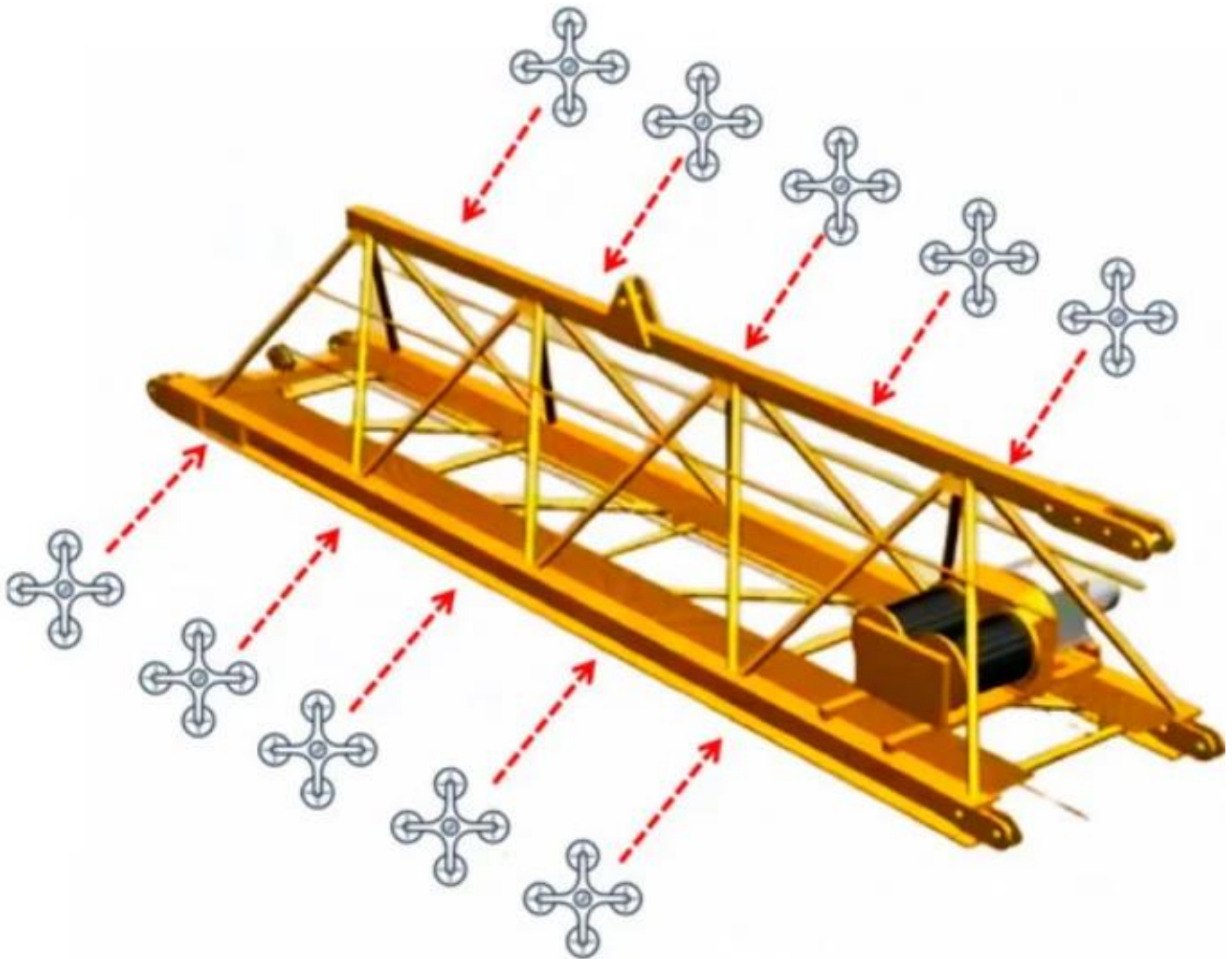


Рисунок 5.4 – Схема технічного огляду стріли крана з допомогою БПЛА

5.7. Пристрої безпеки баштового крана

До пристроїв, що забезпечують безпечну роботу [28] крана, належать запобіжні пристрої такі як: покажчики, обмежувачі робочих положень механізмів і обмежувачі вантажопідйомності.

До запобіжних пристроїв відносяться рейкові захвати, які утримують кран в неробочому стані від переміщення уздовж кранового шляху під дією вітру; запобіжні опори; тупикові упори.

На кранах з балочною стрілою покажчики вильоту (покажчики положення вантажного візка) влаштовані аналогічно покажчику числа обертів барабана вантажної лебідки. Повідець потенціометра у цих покажчиків зв'язується з барабаном лебідки вантажного візка, а на шкалі вольтметра вказується виліт.

На ряді кранів застосовується покажчик вильоту, пов'язаний механічною передачею з барабаном лебідки вантажного візка. Поворот на якийсь кут цього датчика викликає поворот на такий же кут приймача.

Анемометр (М-95М-2) встановлюють на кранах для змоги вимірювання миттєвої швидкості вітру, автоматичного визначення небезпечних по спільному впливу швидкості і тривалості поривів вітру та включення аварійних звукового і світлового сигналів для попередження оператора.

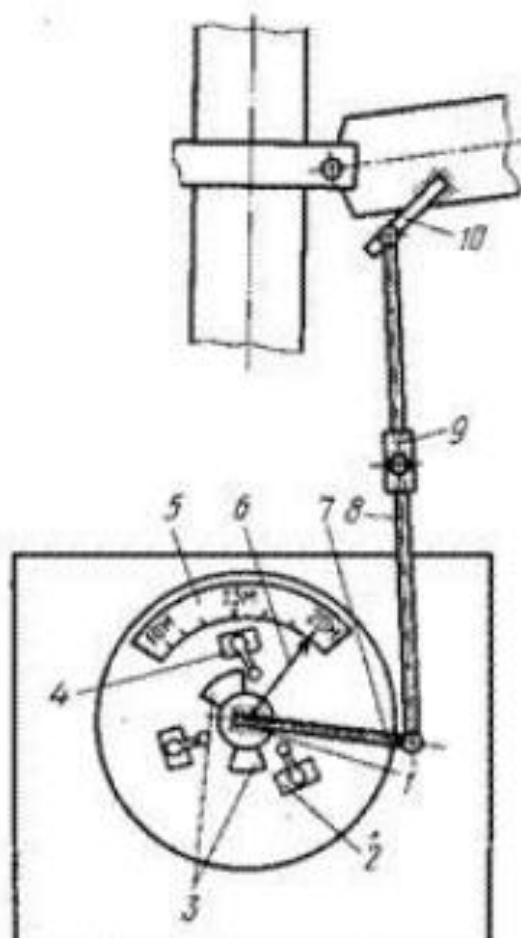


Рисунок 5.5 – Схема покажчика вильоту: 1 - вал, 2,4 - кінцеві вимикачі, 3 - кулачки, 4 - шкала, 6 - стрілка, 7 - важіль, 8 - тяга, 9 - вилка, 10 - кронштейн стріли

Обмежувач повороту служить для автоматичної зупинки механізму повороту після виконання краном з певного числа оборотів (зазвичай не більше двох), рахуючи від початкового положення. В обмежувачі повороту (рис. 5.6) застосований приводний кінцевий вимикач ВУ-250А, вал якого через

вбудований у вимикач редуктор (з передачею 1:50) за допомогою шестерні пов'язаний з зубчастим вінцем опорно-поворотного кулькового кола. Кінцевий вимикач кріпиться на кронштейні до поворотній платформі. Обертання крана викликає поворот валу кінцевого вимикача і розмикання контактів вимикача при досягненні валом певного положення. Обмежувач регулюють зміною положення кулачкових шайб у вимикачі.

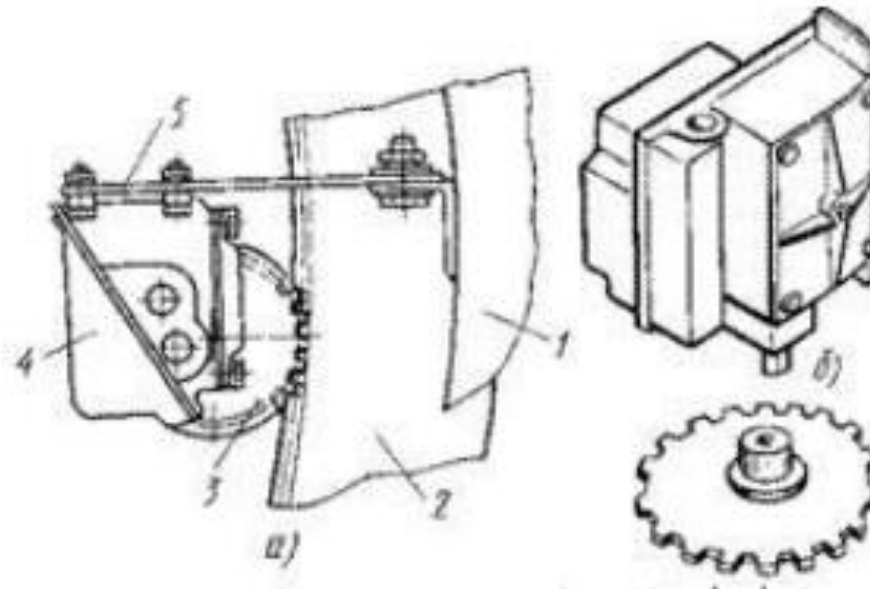


Рисунок 5.6 - Обмежувач повороту: а - загальна схема, б - кінцевий вимикач; 1 - поворотна платформа, 2 - вінець ОПУ, 3 шестерня, 4 - кінцевий вимикач, 5 кронштейн

Безпека баштових кранів – це спільна відповідальність, яка вимагає прихильності до навчання, технічного обслуговування, комунікації та дотримання встановлених протоколів. Надаючи пріоритет заходам безпеки, будівельна галузь може мінімізувати ризики, пов'язані з роботою баштових кранів, створюючи більш безпечне робоче середовище для всіх учасників. Будівельні майданчики, які надають пріоритет безпеці, не тільки захищають свою робочу силу, а й сприяють загальному успіху і стійкості галузі.

ВИСНОВКИ

1. В даній магістерській кваліфікаційній роботі розглянуто розробку оптимальної системи керування механізмом зміни вильоту роботизованого баштового крану. Досліджено які параметри крану та зовнішні тригери впливають на швидкість та точність переміщення вантажу. Доведено актуальність розглянутої теми та наведено кількісний аналіз публікацій.

2. З проведеного аналізу іноземних публікацій за тематикою зроблено висновок про значний інтерес дослідників до проблематики покращення механізму зміни вильоту крану.

3. В пункті 2.2 представлено теоретичну частину, яка описує динамічну та математичну модель механізму зміни вильоту роботизованого баштового крану, особливості синтезу та застосування LQR регулятора, розробку оптимального регулятора в середовищі Wolfram Mathematica.

4. В пунктах 2.2.1 – 2.2.4 проведено чотири досліді з різними параметрами навантаження та вильоту візка – з навантаженнями 20т та 200кг і вильотом 2м та 12м відповідно. Для цих параметрів налаштовано оптимальний LQ регулятор, що дозволяє за короткий час виходити на номінальну швидкість візку з мінімальним перерегулюванням. В першому досліді при навантаженні 20т та вильоті 12м вдалося досягти часу виходу на номінальну швидкість за 5,5 секунд без значних перерегулювань. При цьому ж досягається досить висока точність позиціонування з відхиленням 4мм, що в огляді на розміри крану та будівельного майданчику є досить незначною похибкою. Пікова споживана потужність при такому керуванні склала 894Вт та за півсекунди поступово спадає.

5. В пункті 2.2.4 проведено останній експеримент для конфігурації системи з навантаженням 200кг та вильотом 2м. Встановлено, що оптимальними параметрами регулятора будуть такі значення його коефіцієнтів: $-4,3021 \cdot 10^7$, $4,3021 \cdot 10^7$, -402853 , $3,23128 \cdot 10^6$, $553,297$. При такому налаштуванні вихід на номінальну швидкість в 0,5м/с досягається за час всього 2сек та перерегулювання повністю відсутнє якщо не враховувати ривок швидкості на

початку регулювання. Пікова ж потужність досягається в момент цього ривка та складає 2369Вт. Відхилення від заданого положення в кінці регулювання є нульовим. Таким чином було досліджено яким чином різні вагові коефіцієнти впливають на зміну отримуваних графіків зміни рушійних сил, потужності, швидкості та положення.

6. В пункті 2.3 наведено таблицю порівняльної характеристики з представленням переліку отримуваних даних для наочності різниці в експериментах з різними конфігураціями навантажень.

7. В результаті досліджень було доведено ефективність запропонованої ідеї використання системи шостого порядку, що дозволяє створювати керуючий вплив на прискорення рушійної сили візка роботизованого баштового крану.

8. Розраховано економічний ефект від застосування запропонованої системи оптимального керування механізмом зміни вильоту роботизованого баштового крану. Було виявлено, що її використання значно скорочує робочий цикл крану та витрати електроенергії на приводах. Сумарна економія склала приблизно 265909,918 грн.

Crane Drives. // Faculty of Electrical and Control Engineering, Gdańsk University of Technology, 80-233 Gdańsk, Poland. – 2020. – №13. – С. 1–25.

9. Qiang Li, Weijie Fan, Weijie Fan, Heng Jin. Machine Learning-Based Prediction of Dynamic Responses of a Tower Crane under Strong Coastal Winds. // School of Civil Engineering and Architecture, NingboTech University, Ningbo 315100, China. – 2023. – №11. – С. 1–14.

10. Muhammad Zeshan Akber, Wai-Kit Chan, Ghazanfar Ali Anwar. TPE-Optimized DNN with Attention Mechanism for Prediction of Tower Crane Payload Moving Conditions [Електронний ресурс] // Centre for Advances in Reliability and Safety, Hong Kong Science and Technology Parks, Pak Shek Kok, New Territories, Hong Kong, China. – 2024. – URL: <https://www.mdpi.com/2227-7390/12/19/3006> (дата звернення: 06.11.24)

11. Sorensen K.L., Singhose W., Dickerson S., “A controller enabling precise positioning and sway reduction in bridge and gantry cranes”, Control Engineering Practice,(2007) Vol. 15(7), pp. 825-837

12. Guo, H., Peng, W., Zhang, M. *et al.* Adaptive control for 5-DOF varying-cable-length tower cranes with multivariable state constraints. *Nonlinear Dyn* (2024).

13. В.С. Ловейкін, Ю.О. Ромасевич Аналіз та синтез режимів руху механізмів вантажопідійомних машин. Монографія / – К.: ЦП „КОМПРІНТ”, 2012. - 298 с.

14. Volker Mehrmann, "The autonomous linear quadratic control problem: theory and numerical solution", Springer , 1991, 163

15. Tower Crane Solution: веб-сайт. URL: <https://www.veichi.com/solutions/tower-crane.html> (дата звернення: 10.11.24)

16. W.E. Singhose, Khalid Sorensen Applications and educational uses of crane oscillation control. Стаття / Georgia Institute of Technology, 2006 – 10с.

17. Electrical equipment of tower cranes: веб-сайт. URL: https://kranbud-kzk.kiev.ua/electrical_equipment_of_tower_cranes (дата звернення: 10.11.24)

18. Anti-collision system for Tower Cranes, веб-сайт. URL: <https://raycowylie.com/product/i4508-anti-collision-system-for-tower-cranes/> (дата звернення: 13.11.24)

19. Електричні деталі: веб-сайт. URL: <https://uk.bq-cranes.com/electric-parts/> (дата звернення: 11.11.24)

20. ANALYSIS OF OPERATION EFFICIENCY OF TOWER CRANE IN FORM WORK CONSTRUCTION FOR MULTI-FAMILY HOUSING: веб-сайт. URL: <https://www.iaarc.org/publications/fulltext/P1-2.pdf> (дата звернення: 12.11.24)

21. Lee, J. H., Park, S. J., Oh, S. W., and Kim, Y. S., “A Study on the Work Efficiency Improvement of Tower Crane Operation Using GPS and Machine Vision”, Architectural Institute of Korea, Vol. 18(11) 2002 , 133-139.

22. Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О. Оптимізація перехідних режимів руху механічних систем прямим варіаційним методом. К.: Ніжин: Видавець П. П. Лисенко М. М. 2010. 184 с.

23. Ромасевич Ю. О. Розрахунок економічної ефективності від застосування оптимального керування рухом мостового крана. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів і студентів: «Роль інститутів освіти та науки у формуванні інноваційної культури суспільства». 2013. С. 117–121.

24. Шевчук Олександр Григорович ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ ЗМІНИ ВІЛЬОТУ БАШТОВОГО КРАНА З ШАРНІРНО-ЗЧЛЕНОВАНОЮ СТІЛОВОЮ СИСТЕМОЮ : дис. канд. техн. наук : 05.05.05 / 1 – Київ, 2016. – 158-161 с.

25. Understanding the Safety Hazards in Tower Crane Operation: веб-сайт. URL: <https://heavyequipmentcollege.edu/understanding-the-safety-hazards-in-tower-crane-operation/> (дата звернення: 07.11.24)

26. 9 Tower Crane Safety Tips For Construction Activities: веб-сайт. URL: <https://www.pollisum.com/blog/tower-crane-safety/> (дата звернення: 07.11.24)

27. Jiao, X.; Wu, N.; Zhang, X.; Fan, J.; Cai, Z.; Wang, Y.; Zhou, Z. Enhancing Tower Crane Safety: A UAV-Based Intelligent Inspection Approach. *Buildings* 2024, 15с.

28. Пристрої безпеки баштового крана: веб-сайт. URL: <https://budtehnika.pp.ua/7106-pristroyi-bezpeki-bashtovogo-krana.html> (дата звернення: 07.11.24)

ДОДАТКИ

СИНТЕЗ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ

```
In[1]:= SSM = StateSpaceModel[{{x1''[t] +  $\frac{m_2}{m_1} * x_2''[t] = \frac{F1[t]}{m_1}$ ,
    x1[t] = x2[t] +  $\Omega^{-2} * x_2''[t]$ , F1'[t] = F2[t], F2'[t] = F3[t]},
    {{x1[t], 0}, {x2[t], 0}, {x1'[t], 0}, {x2'[t], 0}, {F1[t], 0}, {F2[t], 0}},
    {{F3[t], 0}}, {x2[t]}, t]
```

```
Out[1]=  $\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\Omega^2 m_2}{m_1} & \frac{\Omega^2 m_2}{m_1} & 0 & 0 & \frac{1}{m_1} & 0 & 0 \\ \Omega^2 & -\Omega^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} s$ 
```

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

```
In[2]:= (*
    Задання чисельних параметрів. Розрахунок декількох варіантів: 1) l=12,
    m2=20000;
    2) l=12, m2=200; 4) l=2, m2=20000; 4) l=2, m2=200;
```

```
*)
l = 12;
m2 = 20000;
```

(*Зведена маса візка механізму зміни вильоту вантажу*)

```
m1 = 200;
g = 9.81;
```

$$\Omega = \sqrt{\frac{g}{l}};$$

```
(*
    Підбір коефіцієнтів  $\delta R$ ,  $\delta F1$ ,  $\delta F2$ ,  $\delta Position$  та  $\delta Velocity$  так, щоб:
    1) перехідний процес
    (вихід швидкості крана на номінальну швидкість) не був довгим; 2)
    перерегулювання швидкості крана не було великим (в ідеалі нульовим); 3)
    мінімізувати піки споживаної потужності. Ці вимоги
    знаходяться в протиріччі,
    тому обрано компроміс. Всі вимоги ранжовані у порядку важливості.
```

Далі складено таблицю -
номер варіанту / рекомендовані значення вагових коефіцієнтів

```
*)
 $\delta R = 8 * 10^{-9}$ ;
```

```

δF1 = 10^-5;
δF2 = 2 * 10^-6;

δPosition = 10^-3;
δVelocity = 10^3;
(*Матриця вагових коефіцієнтів інтегрального критерію оптимізації -
біля фазових змінних*)
Q = DiagonalMatrix[{δPosition, δPosition, δVelocity, δVelocity, δF1, δF2}];
(*Матриця вагових коефіцієнтів інтегрального критерію оптимізації - біля керування*)
R = {{δR}};
(*Розрахунок коефіцієнтів оптимального регулятора*)

Print ["Коефіцієнти лінійно-квадратичного
оптимального регулятора руху механізму зміни вильоту вантажу"]
(*Розрахунок коефіцієнтів оптимального регулятора -
ці дані необхідно занести у записку.*)
K = LQRegulatorGains[SSM, {Q, R}]

(*System with LQR-controller*)
sysLQR = SystemsModelStateFeedbackConnect[SSM, K];
(*Номінальна швидкість візка*)
v = 0.5;
(*Тривалість розгону*)
t1 = 4;
InitialStateVector = List[-(v * t1) / 2, -(v * t1) / 2, -v, -v, 0, 0];
T = 10;
ImSize = 350; TextSize = 12; AspRatio = 0.7;

u = -(K.StateResponse[{SystemsModelStateFeedbackConnect[SSM, K],
InitialStateVector}, {0}, {t, T}][1]);
x1 = StateResponse[{sysLQR, InitialStateVector}, {0, 0}, {t, T}][1];
x2 = StateResponse[{sysLQR, InitialStateVector}, {0, 0}, {t, T}][2];
dx1 = StateResponse[{sysLQR, InitialStateVector}, {0, 0}, {t, T}][3];
dx2 = StateResponse[{sysLQR, InitialStateVector}, {0, 0}, {t, T}][4];
FDrive = StateResponse[{sysLQR, InitialStateVector}, {0, 0}, {t, T}][5];
dFDrive = StateResponse[{sysLQR, InitialStateVector}, {0, 0}, {t, T}][6];
ConsumedPower = (v + dx1) * FDrive;

Plot[FDrive, {t, 0, T}, Frame -> True, ImageSize -> ImSize,
FrameLabel -> {Text[Style["t, c", FontSize -> TextSize, Italic, Bold, Black]],
Text[Style["F(t), H", FontSize -> 12, Italic, Bold, Black]]},
AspectRatio -> AspRatio, PlotStyle -> {Thickness[0.007], Black},
GridLines -> Automatic, PlotRange -> All, AxesOrigin -> {0, 0}]

```

```
Plot[dFDrive, {t, 0, T}, Frame → True, ImageSize → ImSize,
  FrameLabel → {Text[Style["t, c", FontSize → TextSize, Italic, Bold, Black]],
    Text[Style["Ḟ, H/c", FontSize → 12, Italic, Bold, Black]]},
  AspectRatio → AspRatio, PlotStyle → {Thickness[0.007], Black},
  GridLines → Automatic, PlotRange → All, AxesOrigin → {0, 0}]
```

```
Plot[u, {t, 0, T}, Frame → True, ImageSize → ImSize,
  FrameLabel → {Text[Style["t, c", FontSize → TextSize, Italic, Bold, Black]],
    Text[Style["F̈, H/c²", FontSize → 12, Italic, Bold, Black]]},
  AspectRatio → AspRatio, PlotStyle → {Thickness[0.007], Black},
  GridLines → Automatic, PlotRange → All, AxesOrigin → {0, 0}]
```

```
Plot[ConsumedPower, {t, 0, T}, Frame → True, ImageSize → ImSize,
  FrameLabel → {Text[Style["t, c", FontSize → TextSize, Italic, Bold, Black]],
    Text[Style["P, Bτ", FontSize → 12, Italic, Bold, Black]]},
  AspectRatio → AspRatio, PlotStyle → {Thickness[0.007], Black},
  GridLines → Automatic, PlotRange → All, AxesOrigin → {0, 0}]
```

```
ParametricPlot[{x1 - x2, dx1 - dx2}, {t, 0, T}, Frame → True, ImageSize → ImSize,
  FrameLabel → {Text[Style["x1-x2, m", FontSize → TextSize, Italic, Bold, Black]],
    Text[Style["ẋ1-ẋ2, m/c", FontSize → 12, Italic, Bold, Black]]},
  AspectRatio → AspRatio, PlotStyle → {Thickness[0.007], Black},
  GridLines → Automatic, PlotRange → All, AxesOrigin → {0, 0}]
```

```
pLQRState = Plot[v + dx1, {t, 0, T}, Frame → True, ImageSize → ImSize,
  FrameLabel → {Text[Style["t, c", FontSize → TextSize, Italic, Bold, Black]],
    Text[Style["ẋ1(t), m/c", FontSize → 12, Italic, Bold, Black]]},
  AspectRatio → AspRatio, PlotStyle → {Thickness[0.007], Black},
  GridLines → Automatic, PlotRange → All, AxesOrigin → {0, 0}]
```

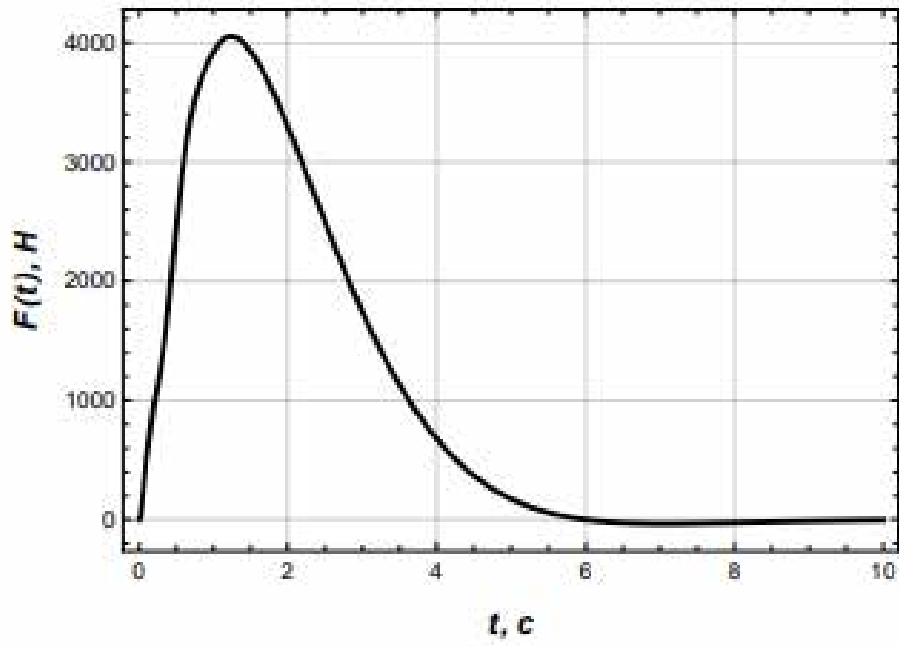
Коефіцієнти лінійно-квадратичного

оптимального регулятора руху механізму зміни вильоту вантажу

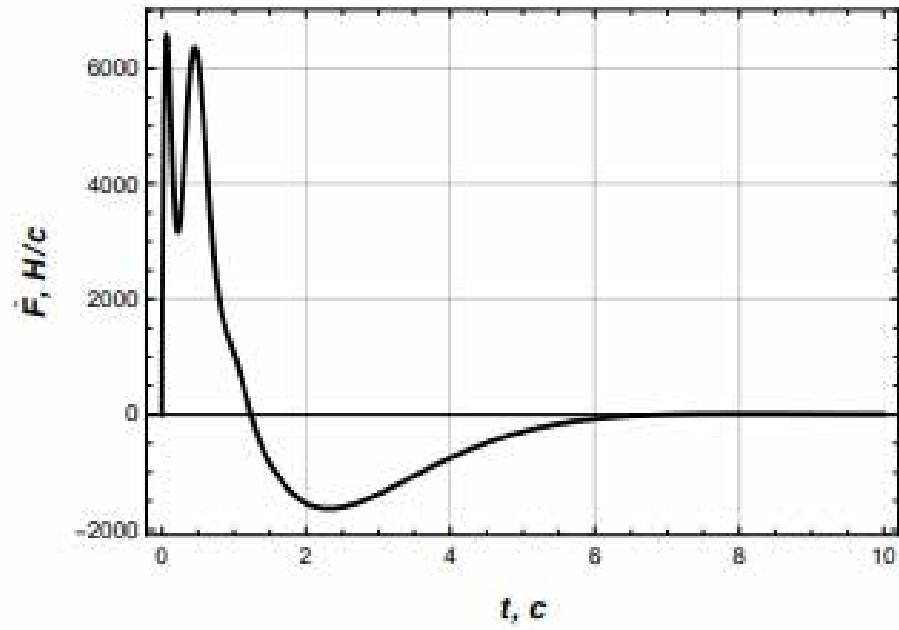
|-

```
{{-3.10108 × 106, 3.10158 × 106, 82919.9, 418000., 233.367, 26.7719}}
```

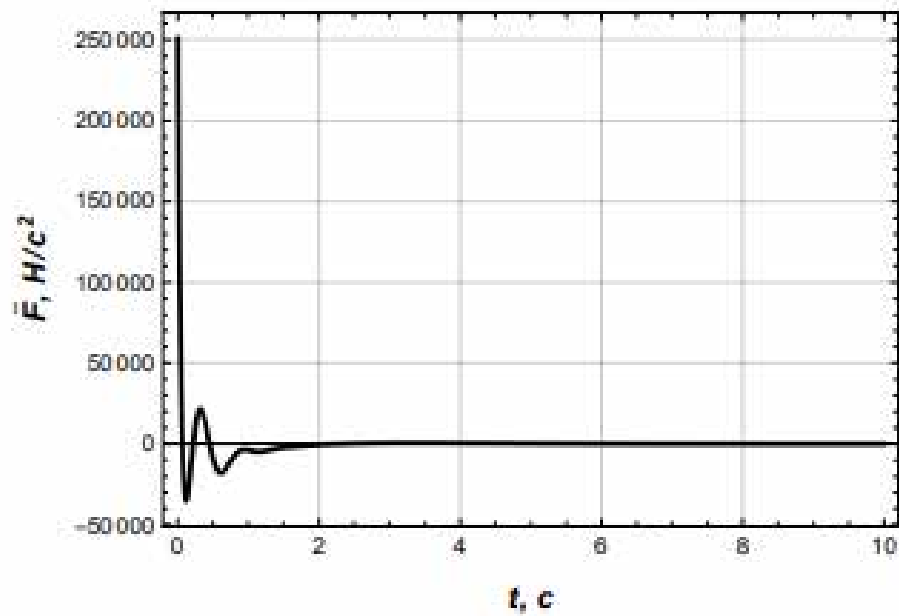
Out[30]=

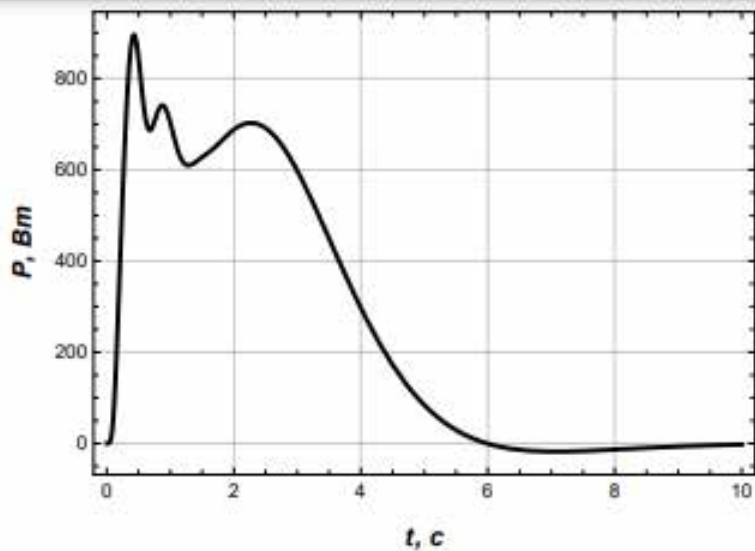


Out[31]=

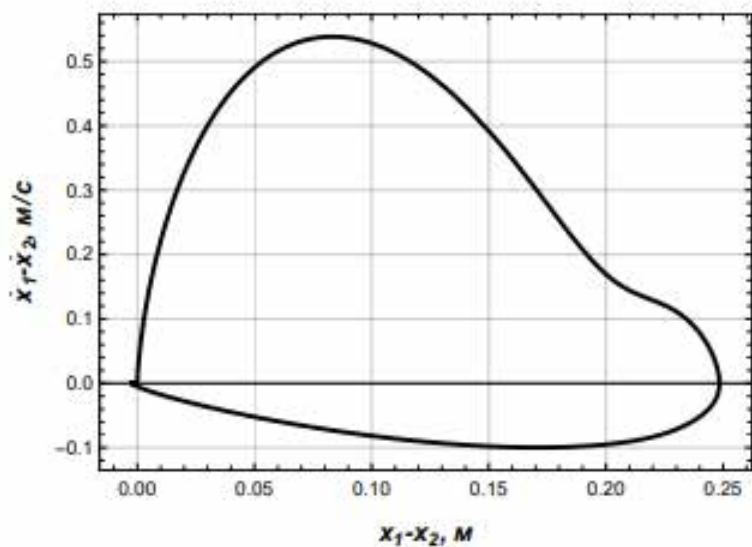


Out[32]=

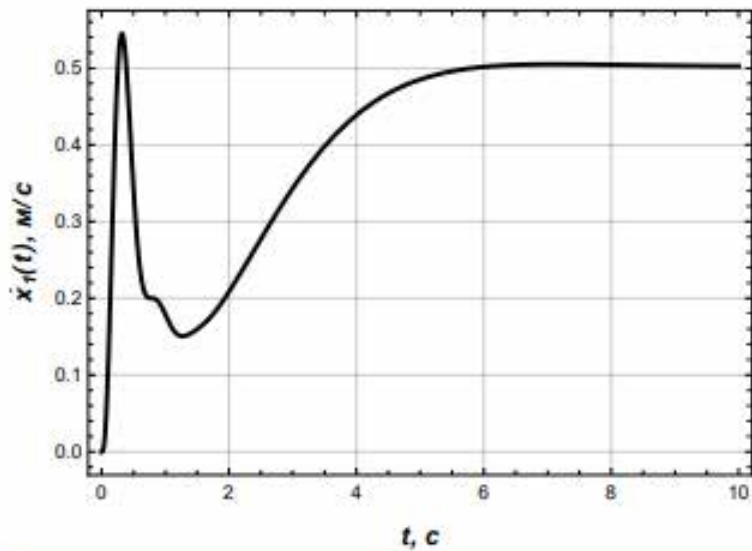




Out[34]=



Out[35]=



```

In[36]:= uTable = Table[u /. t -> τ, {τ, 0, T, 0.005}];
          FTable = Table[FDrive /. t -> τ, {τ, 0, T, 0.005}];
          dFTable = Table[dFDrive /. t -> τ, {τ, 0, T, 0.005}];

```

```

ConsumedPowerTable = Table[ConsumedPower /. t -> τ, {τ, 0, T, 0.005}];
x1Table = Table[x1 /. t -> τ, {τ, 0, T, 0.005}];
x2Table = Table[x2 /. t -> τ, {τ, 0, T, 0.005}];
dx1Table = Table[dx1 /. t -> τ, {τ, 0, T, 0.005}];
dx2Table = Table[dx2 /. t -> τ, {τ, 0, T, 0.005}];

```

(*КЛАС СЕРЕДНЬОКВАДРАТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ*)

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

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

```
Print["Середньоквадратичне значення швидкості зміни рушійного зусилля, Н/с"]
```

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

```
Print["Середньоквадратичне значення пришвидшення зміни рушійного зусилля, Н/с2"]
```

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

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

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

```
Print["Середньоквадратичне значення відхилення канату від вертикалі, м"]
```

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

(*КЛАС МАКСИМАЛЬНИХ ПОКАЗНИКІВ*)

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

```
Abs[Max[FTable]]
```

```
Print["Максимальне значення швидкості зміни рушійного зусилля, Н/с"]
```

```
Abs[Max[dFTable]]
```

```
Print["Максимальне значення пришвидшення зміни рушійного зусилля, Н/с2"]
```

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

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

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

```
Print["Максимальне значення відхилення канату від вертикалі, м"]
```

Середньоквадратичне значення рушійного зусилля, Н

Out[45]=
1719.72

Середньоквадратичне значення швидкості зміни рушійного зусилля, Н/с

Out[47]=
1528.5

Середньоквадратичне значення пришвидшення зміни рушійного зусилля, Н/с²

Out[49]=
10996.1

Середньоквадратичне значення потужності, Вт

Out[51]=
395.508

Середньоквадратичне значення відхилення канату від вертикалі, м

Out[53]=
0.105222

Максимальне значення рушійного зусилля, Н

Out[55]=
4053.42

Максимальне значення швидкості зміни рушійного зусилля, Н/с

Out[57]=
6563.27

Максимальне значення пришвидшення зміни рушійного зусилля, Н/с²

Out[59]=
250960.

Максимальне значення потужності, Вт

Out[61]=
895.326

Максимальне значення відхилення канату від вертикалі, м

Out[63]=
0.248387

In[64]:=
$$\sqrt{\frac{\text{NIntegrate}[(v + dx_1)^2, \{t, \theta, T\}]}{T}}$$

Out[64]=
0.429057

In[66]:= $Q = \text{MatrixForm}[\text{DiagonalMatrix}[\{\delta\text{Position}, \delta\text{Position}, \delta\text{Velocity}, \delta\text{Velocity}, \delta F1, \delta F2\}]]$

Out[66]//MatrixForm=

$$\begin{pmatrix} \frac{1}{1000} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{1000} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{100000} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{500000} \end{pmatrix}$$

In[69]:= $R = \{\{\delta R\}\}$

Out[69]=

$$\left\{ \left\{ \frac{1}{125000000} \right\} \right\}$$