

НУБІП України

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

НУБІП України

01.09. – КМР.464 «С». 2023.28.03. 026. ПЗ

НУБІП України

ВЛОВИНЕЦЬ ДІМИТРО ОЛЕКСІЙОВИЧ

2023

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ

І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет конструювання та дизайну

УДК 621.8.055.22

ПОГОДЖЕНО:

Декан факультету

конструювання та дизайну

Ружи́ло З.В.

(підпис)

« » листопада 2023 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ:

Завідувач кафедри конструювання

машин і обладнання

Ловейкін В.С.

(підпис)

« » листопада 2023 р.

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

на тему: «ОПТИМІЗАЦІЯ СУМІСНОГО РУХУ МЕХАНІЗМІВ

БАНТОВОГО КРАНА ПРИ РУСІ ВАНТАЖУ ПОЗАДАНІЙ
ТРАКТОРІЙ»

01.09. – КМР.464 «С», 2023.28.03. 026. ЛЗ

Спеціальність - 133 «Галузеве машинобудування»

Освітня програма - «Машини та обладнання сільськогосподарського
виробництва»

Срієнтація освітньої програми - освітньо-професійна

Керівники магістерської роботи:

д.т.н. проф.

Виконав:

Ромасевич Ю.О.

(підпис)

Вловинець Д.О.

(підпис)

Київ-2023

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
Факультет конструювання та дизайну

ЗАТВЕРДЖУЮ:

**Завідувач кафедри конструювання
машин і обладнання, д.т.н.**

Ловейкін В.С.

(підпис)

« » листопад 2023 р.

ЗАВДАННЯ

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ

ВДОВИНЕЦЮ ДМИТРУ ОЛЕКСІЙОВИЧУ

Спеціальність – 133 «Галузеве машинобудування»

Освітня програма – «Машини та обладнання сільськогосподарського
виробництва»

Орієнтація освітньої програми – освітньо-професійна

Тема магістерської роботи: «оптимізація сумісного руху механізмів
баштового крана при русі вантажу по заданій траєкторії», затверджена наказом
ректора від «28» березня 2023 р. № 464 «С».

Термін подання завершеної роботи на кафедру 06.11.2023 р.

Вихідні дані до магістерської роботи: Дослідження в області оптимізації
сумісного руху механізмів баштового крану при русі вантажу по заданій
траєкторії, розробка та аналіз законів руху механізмів зміни вильоту вантажу і
повороту крану, економічний ефект.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Провести аналітичний огляд існуючих наукових та технічних розробок у
сфері оптимізації координованого руху механізмів баштових кранів, з

акцентом на методології та стратегії, що застосовуються для точного планування траєкторії переміщення вантажу з врахуванням специфіки роботи кранів.

2. Виконати розробку законів руху механізмів зміни вильоту вантажу і повороту крану з метою оптимізації їх руху.

3. Розробити методику практичної реалізації запропонованих оптимізованих законів руху механізмів баштового крана для забезпечення точного і ефективного переміщення вантажу по заданій траєкторії.

4. Оцінити економічну вигоду та рентабельність впровадження оптимізованої системи управління механізмами баштового крана для забезпечення ефективного руху вантажу.

Перелік графічних документів:

Дата видачі завдання 14.10.2022 р.

Керівник магістерської роботи:
д.т.н. проф.

Ромасевич Ю.О.

(підпис)

Завдання прийняв до виконання:

Вдовинець Д.О.

(підпис)

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ 7
ВСТУП 9

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ БАШТОВИХ КРАНІВ

ЗМІСТ

..... 11
1.1 Опис баштових кранів та їх ролі в сучасному будівництві 11
1.2 Огляд механізмів руху вантажу та їх взаємодії 15

1.3 Принципи планування траєкторії руху вантажу 17

ЗМІСТ

Висновки до розділу I: 18

РОЗДІЛ 2. ОГЛЯД НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ТЕХНОЛОГІЙ У СФЕРІ ОПТИМІЗАЦІЇ РУХУ БАШТОВИХ КРАНІВ

..... 19

2.1 Кількісний аналіз наукових досліджень та розвитку технологій у сфері оптимізації руху баштових кранів 19

ЗМІСТ

2.2 Якісний аналіз прогресу у наукових дослідженнях та технологічних інноваціях оптимізації руху баштових кранів 22

Висновки до розділу 2: 31

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МЕТОДІВ ОПТИМІЗАЦІЇ ДЛЯ КООРДИНОВАНОГО РУХУ МЕХАНІЗМІВ БАШТОВОГО КРАНА

..... 32

3.1 Аналіз та оцінка результатів першого наближення в побудові законів руху механізмів баштового крана 32

ЗМІСТ

3.2 Розвиток та удосконалення законів руху у другому наближенні 39
3.3 Інтеграція та оцінка ефективності удосконалених законів руху в третьому наближенні 45

Висновки до розділу 3: 52

ЗМІСТ

РОЗДІЛ 4 ПРАКТИЧНЕ ВПРОВАДЖЕННЯ ОПТИМІЗАЦІЇ СУМІСНОГО
РУХУ У РОБОТІ БАШТОВИХ КРАНІВ

НУБІП України

4.1 Аналіз моделі баштового крану з точки зору технічних можливостей та
практичної реалізації сумісності з системами оптимізації..... 54

4.2 Рекомендації щодо обладнання баштового крану для практичної реалізації

НУБІП України

4.3 Розрахунок економічної ефективності баштового крана Liebherr 71 ES..... 64

Висновки до розділу 4: 70

ВИСНОВОК..... 71

НУБІП України

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... 72

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

РЕФЕРАТ

НУБІП України

Актуальність. У контексті стрімкого розвитку промисловості та будівельної сфери, вдосконалення технологій, зокрема у сфері баштових кранів, набуває особливої ваги. Оптимізація сумісного руху механізмів баштового крана при русі вантажу по заданій траєкторії є ключовою для підвищення ефективності, зниження енергоспоживання та підвищення безпеки робочих процесів. Точність та оптимальність руху вантажу впливають не тільки на продуктивність, але й на якість виконання будівельних робіт.

НУБІП України

Мета і задачі дослідження. Основною метою даного дослідження є розробка ефективного методу для оптимізації сумісного руху механізмів баштового крана, з метою забезпечення точного переміщення вантажу за заданою траєкторією. Для досягнення цієї мети визначено наступні завдання: аналіз існуючих методик та технологій в цій сфері, розробка та тестування математичної моделі для оптимізації руху, проведення експериментальних досліджень, а також аналіз економічної ефективності запропонованого рішення.

НУБІП України

Об'єкт дослідження – процеси управління та координації руху механізмів баштового крана при переміщенні вантажу.

НУБІП України

Предмет дослідження – методи, алгоритми та моделі для оптимізації сумісного руху механізмів баштового крана, спрямовані на забезпечення ефективного та безпечного переміщення вантажу за заданою траєкторією.

НУБІП України

Методика дослідження. У дослідженні використовуються комплексні підходи, що включають аналіз сучасних наукових робіт і публікацій, математичне моделювання процесів руху, проведення експериментальних досліджень на установках баштових кранів, а також оцінку економічної ефективності розробленого методу. Цей комплексний підхід дозволяє всебічно

НУБІП України

вивчити проблему та знайти оптимальні рішення для підвищення продуктивності та безпеки роботи баштових кранів.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

ВСТУП

НУБІП України

Актуальність теми "Оптимізація сумісного руху механізмів баштового крана при русі вантажу по заданій траєкторії" виходить за межі простого технічного вдосконалення і охоплює широкий спектр важливих аспектів:

НУБІП України

– Забезпечення безпеки на будівельному майданчику – оптимізація руху кранів має критичне значення для забезпечення безпеки робочого персоналу та запобігання нещасним випадкам. Контрольований і точний рух механізмів дозволяє уникнути непередбачуваних ситуацій, які можуть

НУБІП України

виникнути через людську помилку або технічні недоліки. Економічна ефективність – оптимізовані системи управління рухом крана можуть значно скоротити час на виконання робіт та зменшити витрати на енергоспоживання та технічне обслуговування. Це веде до зниження

НУБІП України

загальних витрат будівництва та підвищення загальної продуктивності проектів.

НУБІП України

– Точність і якість роботи – точне переміщення вантажів відіграє ключову роль у будівельних проектах, де потрібна висока точність, як наприклад, при монтажі великих конструкцій. Оптимізація дозволяє забезпечити високу точність при роботі з великогабаритними та важкими вантажами.

НУБІП України

– Технологічний прогрес у будівельній індустрії – сучасні будівельні проекти стають все складнішими та технологічно вдосконаленими. Розвиток методів оптимізації руху механізмів кранів відповідає потребам індустрії у використанні інноваційних технологій для підвищення ефективності та якості будівництва.

НУБІП України

– Екологічний вплив – ефективніша робота баштових кранів також сприяє зниженню викидів вуглекислого газу, оскільки оптимізовані механізми

використовують менше енергії. Це важливо в контексті глобальних зусиль зі скорочення впливу на довкілля.

Адаптація до змінних умов будівництва – здатність швидко адаптуватися до різних умов і вимог будівельного процесу є ключовою вимогою сучасного будівництва. Оптимізація руху дозволяє гнучко реагувати на такі зміни, забезпечуючи ефективність роботи в різних умовах.

Основною ціллю дослідження є розробка та впровадження методів оптимізації сумісного руху механізмів баштового крана для забезпечення ефективного і безпечного переміщення вантажу по заданій траєкторії. Для

досягнення цієї мети поставлено наступні завдання:

1. Аналіз існуючих методів управління рухом механізмів баштових кранів.
2. Вивчення фізичних та механічних особливостей роботи механізмів крана.
3. Розробка математичної моделі для оптимізації руху механізмів.
4. Проведення експериментальних досліджень.
5. Оцінка ефективності запропонованих рішень у плані точності, безпеки та економічності.

Методологічний підхід дослідження базується на комбінації теоретичного аналізу існуючих технологій і практичного експериментування.

Використовуються математичне моделювання, числові методи для оптимізації, а також методи машинного навчання для адаптації та поліпшення управління рухом механізмів. Обґрунтування вибору теми випливає з потреби в підвищенні безпеки та ефективності будівельних робіт, а також із зростаючого попиту на інноваційні рішення в цій галузі. Тема є актуальною, оскільки вона спрямована на вирішення реальних технічних та економічних проблем, що стоять перед будівельною індустрією.

РОЗДІЛ 1

ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ БАШТОВИХ КРАНІВ

Цей розділ присвячений вивченню теоретичних аспектів функціонування баштових кранів, які є невід'ємною частиною сучасних будівельних майданчиків. Буде розглянуто історію розвитку та основні конструктивні особливості баштових кранів, їхні типи та характеристики. Особлива увага буде приділена механізмам руху вантажу, системам управління та безпеки, а також факторам, що впливають на ефективність та надійність їхньої роботи. Цей розділ покладе фундамент для глибшого розуміння комплексних процесів, що відбуваються при роботі баштових кранів, та їх значення у будівельній індустрії.

1.1 Опис баштових кранів та їх ролі в сучасному будівництві

Баштові крани є невід'ємною частиною сучасного будівництва, виконуючи ключову роль у підйомі та переміщенні великих вантажів. Вони являють собою поворотні крани стрілового типу зі стрілою, закріпленою у верхній частині вертикально розташованої башти, становлячи приблизно 18% машинного парку пересувних кранів[1].

Поява баштових кранів сучасного типу відбулася у 1913 році завдяки роботам Юлуса Вольфа, який створив кран з поворотною платформою. У 1928 році було спроектовано перший кран з балковою стрілою, а в 1952 році — з підйомною. У радянські часи, зокрема в роки перших п'ятирічок, баштові крани активно використовувалися на будівельних майданчиках. Станом на 1 січня 2008 року в Україні експлуатувалося 5336 таких кранів [1].



Рис. 1.1 – Самопідйомні крани на будівництві нового ВТЦ, Нью-Йорк

Основне призначення баштових кранів – обслуговування території будівельних майданчиків будівель і споруд, складів, полігонів, а також навантаження та розвантаження матеріалів з транспорту під час виконання будівельно-монтажних і вантажно-розвантажувальних робіт [1].

Баштові крани є незамінними для великомасштабних будівельних проєктів, оскільки вони дозволяють швидко та ефективно переміщувати вантажі великої ваги на великі відстані та на значні висоти. Це важливо, особливо в міських умовах, де простір обмежений, а потреба у швидкому та безпечному підйомі великих об'ємів матеріалів висока. Використання баштових кранів дозволяє оптимізувати робочий процес, зменшити фізичну працю людей та підвищити безпеку на будівельному майданчику.

НУБІП України



Рис. 1.2 – Баштовий кран для гідротехнічного будівництва

Баштові крани розрізняються за різними критеріями, включаючи висоту підйому, дальність вильоту стріли, вантажопідйомність, а також типи конструкцій. Вони можуть бути стаціонарними або пересувними, що дозволяє використовувати їх в різних умовах та на різноманітних об'єктах. Така універсальність і адаптивність робить баштові крани незамінними у сучасному будівництві.

НУ

НУ

НУ



И

И

И

Рис. 1.3 – Кран «Liebherr» з маховою стрілою

НУБІП УКРАЇНИ

Завдяки технологічному прогресу, сучасні баштові крани оснащені розширеними системами безпеки, автоматизації та контролю, що дозволяє максимально оптимізувати робочий процес, знижувати ризики та підвищувати продуктивність роботи. Новітні розробки включають системи дистанційного керування, комп'ютерне моделювання та моніторинг роботи крана, що дозволяє

НУБІП УКРАЇНИ

більш точно керувати навантаженнями та слідкувати за станом обладнання в реальному часі.

НУБІП УКРАЇНИ

Окрім цього, сучасні баштові крани відрізняються підвищеною мобільністю та гнучкістю у використанні. Їх можна швидко монтувати, демонтувати та переміщувати, що робить їх ідеальними для використання на різних будівельних майданчиках, включаючи обмежені міські умови. Ця мобільність дозволяє оптимізувати логістику на майданчику, забезпечуючи

НУБІП УКРАЇНИ

ефективне використання часу та ресурсів.

Враховуючи вищезгадані аспекти, баштові крани продовжують залишатися ключовим обладнанням у будівельній індустрії, сприяючи підвищенню ефективності та безпеки будівельних робіт. Їх використання є вирішальним фактором у забезпеченні успішного виконання складних будівельних проєктів, вимагаючи водночас постійного технічного вдосконалення та інновацій для адаптації до змінних умов та викликів сучасного будівництва.

1.2 Огляд механізмів руху вантажу та їх взаємодії

Баштовий кран, відомий також як Tower crane або Grue à tour, є поворотним краном стрілового типу, в якому стріла закріплена у верхній частині вертикально розташованої башти. Ці крани становлять близько 18% від загальної кількості пересувних кранів. Основні механізми руху вантажу в баштовому крані включають зміну вильоту, підйом стріли, поворот, та пересування крана. Зміна вильоту стріли залежить від її типу та виконується шляхом підйому або опускання стріли, або переміщенням вантажного візка уздовж стріли [1].



Рис. 1.4 – Робоча стріла

Баштові крани – це високоефективне обладнання, призначене для роботи на будівельних майданчиках, де необхідно переміщати великі вантажі на значні відстані. Їх використання включає будівництво висотних споруд, заводів, мостів, та інших великих конструкцій. Важливість баштових кранів полягає у їх здатності до виконання складних завдань з мінімальним ризиком для безпеки та з високою точністю.

Механізми руху вантажу в баштових кранах розроблені таким чином, щоб забезпечувати максимальну гнучкість у роботі з різними видами вантажів і в різних умовах. Зміна вильоту стріли, наприклад, дозволяє операторам крана точно позиціонувати вантажі на будівельному майданчику, адаптуючись до різних вимог проекту. Система повороту башти забезпечує можливість обертання крана на 360 градусів, що є ключовим для роботи у обмеженому просторі, як це часто буває у міських умовах.

Крім того, баштові крани часто оснащені сучасними технологіями, які включають комп'ютерне управління, системи моніторингу, та датчики безпеки. Ці технології значно підвищують ефективність та безпеку роботи, дозволяючи операторам крана здійснювати більш точні та контрольовані рухи вантажу.

Підсумовуючи, баштові крани – це складні механізми, які відіграють вирішальну роль у сучасному будівництві. Їх здатність до виконання великих вантажних та висотних робіт з високою точністю та ефективністю є незамінною. Інновації та технічні удосконалення в цій галузі продовжують розвиватися, спрямовані на підвищення безпеки, зменшення фізичного навантаження на операторів, та підвищення продуктивності робочих процесів. Управління рухом вантажу та координація механізмів баштових кранів є складними, але важливими аспектами, які потребують глибокого розуміння фізики, механіки, та інженерії для забезпечення ефективної та безпечної роботи на будівельних майданчиках.

1.3 Принципи планування траєкторії руху вантажу

Принципи планування траєкторії руху вантажу баштовими кранами є ключовим аспектом їхньої ефективної та безпечної роботи. Ці принципи включають:

- *Фізичні обмеження крана* вимагають розуміння його технічних параметрів, таких як максимальна вантажопідйомність, радіус дії та висота підйому, що допомагає уникнути перевантаження та забезпечує безпечне використання крана.
- *Безпека руху* включає аналіз ризиків, таких як потенційні зіткнення з іншими об'єктами та забезпечення стабільності крана під час руху вантажу, мінімізуючи ці ризики для безпечного виконання робіт.
- *Оптимізація руху* передбачає забезпечення найефективнішого переміщення вантажу, зниження часу виконання робіт та

енергоспоживання, вибір оптимальних шляхів переміщення вантажу, уникнення перешкод і забезпечення плавного руху.

Урахування зовнішніх умов включає врахування погодніх умов, таких як вітер, дощ або низькі температури, які можуть впливати на безпеку та точність роботи крана, та планування має бути гнучким і адаптованим до зміни умов.

Координація на майданчику є важливою складовою ефективного планування, забезпечуючи взаємодію та комунікацію між усіма учасниками будівельного процесу, що дозволяє уникнути помилок і забезпечує високу продуктивність роботи.

Адаптація до специфіки проекту включає аналіз специфіки місцевості, типу вантажу та загальних цілей проекту для забезпечення найефективнішого та безпечного використання крана, оскільки кожен будівельний проект має свої унікальні вимоги та обмеження.

Ці принципи вимагають глибокого розуміння механіки роботи кранів та будівельних процесів, а також здатності до гнучкого планування та швидкого реагування на зміни умов на будівельному майданчику.

Висновки до розділу 1:

У цьому розділі було розглянуто ключові теоретичні аспекти роботи баштових кранів, включаючи їх опис, роль у сучасному будівництві, механізми руху вантажу та принципи їх планування. Значну увагу приділено аналізу існуючих методів оптимізації руху вантажів. Вивчення цих аспектів надає глибоке розуміння складності та важливості баштових кранів у будівельному процесі, висвітлюючи необхідність продовження розвитку технологій та методів для підвищення їхньої ефективності та безпеки.

РОЗДІЛ 2

ОГЛЯД НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ТЕХНОЛОГІЙ У СФЕРІ ОПТИМІЗАЦІЇ РУХУ БАШТОВИХ КРАНІВ

2.1 Кількісний аналіз наукових досліджень та розвитку технологій у сфері оптимізації руху баштових кранів

У сучасному світі індустріальної інженерії та будівництва, баштові крани відіграють ключову роль у забезпеченні ефективності та продуктивності на будівельних майданчиках. Оптимізація руху цих кранів не лише підвищує ефективність роботи, але й знижує вірогідність виникнення аварійних ситуацій, що є критично важливим для забезпечення безпеки на робочому місці. Це пітання зосереджується на кількісному аналізі наукових досліджень та розвитку технологій у цій сфері, що дозволить нам зрозуміти динаміку інтересу та інновацій, які формують сучасні практики управління баштовими кранами.

Важливість такого аналізу полягає у виявленні основних напрямків наукових досліджень та технологічних інновацій, що мають потенціал суттєво вплинути на методи оптимізації руху кранів. Це включає в себе аналіз кількості наукових публікацій, патентів, та технологічних розробок у цій області. Такий підхід дозволить оцінити поточний стан розвитку галузі, визначити ключові тенденції та прогнозувати майбутні напрямки досліджень та інновацій.

Додатково, аналізуватимемо динаміку пошукових запитів, пов'язаних із оптимізацією руху баштових кранів. Це надасть уявлення про зростаючий інтерес до цієї тематики серед науковців, інженерів, та фахівців у сфері будівництва. Такий підхід допоможе визначити, які аспекти оптимізації руху баштових кранів привертають найбільшу увагу та як це впливає на напрямки досліджень та розробок у галузі.

Цей кількісний аналіз є важливим кроком у глибшому розумінні того, як змінюється сфера оптимізації руху баштових кранів, та які фактори сприяють цим змінам. Це забезпечить цінний інсайт для формування стратегій розвитку та впровадження інноваційних підходів у сфері будівництва.

Таблиця 2.1

Кількість пошукових запитів за період 2019-2023 рр.

Найменування пошукових запитів	Роки				
	2023	2022	2021	2020	2019
<i>Tower crane motion optimization techniques</i>	548	538	514	393	284
<i>Research studies on tower crane movement efficiency</i>	622	650	633	504	663
<i>Innovations in tower crane operational dynamics</i>	266	293	289	207	149
<i>Comparative analysis of tower crane movement control systems</i>	496	520	518	417	497

Таблиця 2.1 представляє кількість пошукових запитів за 2019-2023 роки, зосереджених на чотирьох темах, пов'язаних із баштовими кранами. Розглянемо кожний пошуковий запит:

- 1) *Техніки оптимізації руху баштових кранів (Tower crane motion optimization techniques)*
З 2019 по 2023 рік кількість запитів зростає з 284 до 548, показуючи стійке збільшення інтересу. Найбільше зростання спостерігається між 2019 і 2020

роками, що може свідчити про збільшення уваги до оптимізації руху кранів у цей період.

2) *Дослідження ефективності руху баштових кранів (Research studies on tower crane movement efficiency)*

Тут ми бачимо флуктуацію: пік був у 2022 році з 650 запитами, з незначним зниженням у 2023 році до 622. Цікаво, що в 2019 році було 663 запити, що є вищим, ніж у наступні роки, крім 2022, що може вказувати на коливання інтересу до цієї теми.

3) *Інновації у динаміці експлуатації баштових кранів (Innovations in tower crane operational dynamics)*

З 2019 по 2023 рік кількість запитів зросла з 149 до 266. Хоча зростання є стійким, загальна кількість запитів залишається відносно низькою порівняно з іншими категоріями, що може вказувати на більш нішевий інтерес у цій сфері.

4) *Порівняльний аналіз систем управління рухом баштових кранів (Comparative analysis of tower crane movement control systems)*

Тут спостерігається загальне зростання від 497 запитів у 2019 році до 496 у 2023, з піком у 520 запитів у 2022 році. Цікаво, що кількість запитів залишалася відносно стабільною, що може свідчити про постійний, але не різко зростаючий інтерес.

Підсумовуючи вище проведений аналіз слід відзначити основні тенденції у сфері дослідження та оптимізації роботи баштових кранів. Загальний тренд вказує на стійке зростання інтересу до цієї тематики, що проявляється у збільшенні кількості пошукових запитів з 2019 по 2023 рік. Найбільше зростання спостерігається у категорії "Техніки оптимізації руху баштових кранів", що свідчить про значне посилення інтересу до вдосконалення та покращення ефективності роботи цих машин. Категорія "Дослідження ефективності руху баштових кранів" показує певне коливання інтересу, вказуючи на змінні

НУБІП УКРАЇНИ

пріоритети у галузі. Також помітно зростання інтересу до "Інновацій у динаміці експлуатації баштових кранів" та "Порівняльного аналізу систем управління рухом баштових кранів", хоча ці категорії залишаються менш популярними порівняно з іншими. Ці дані можуть слугувати важливим орієнтиром для подальших досліджень та розробок у цій галузі.

НУБІП УКРАЇНИ

2.2 Якісний аналіз прогресу у наукових дослідженнях та технологічних інноваціях оптимізації руху баштових кранів

Після детального кількісного огляду, наступним важливим кроком у дослідженні є якісний аналіз наукових публікацій та технологічних інновацій у сфері оптимізації руху баштових кранів. Цей підрозділ спрямований на глибоке занурення у змістовні аспекти досліджень, оцінюючи не лише обсяг наукових праць, але й їх якість, новаторство та вплив на галузь.

НУБІП УКРАЇНИ

Головна зосередженість буде на чотирьох ключових темах, виявлених у нашому кількісному аналізі, а саме. "Техніки оптимізації руху баштових кранів" (Tower crane motion optimization techniques), "Дослідження ефективності руху баштових кранів" (Research studies on tower crane movement efficiency), "Інновації у динаміці експлуатації баштових кранів" (Innovations in tower crane operational dynamics) та "Порівняльний аналіз систем управління рухом баштових кранів" (Comparative analysis of tower crane movement control systems).

Аналізуючи наукові публікації за цими запитками, слід зосередити увагу на таких аспектах:

- Інноваційність та оригінальність ідей: Які нові підходи та концепції були запропоновані в області оптимізації руху баштових кранів?
- Практичне застосування та результати: Як ці дослідження перетворюються на практичні рішення та який їх вплив на ефективність та безпеку роботи кранів?

НУБІП УКРАЇНИ

Критичний аналіз та оцінка впливу: Яким чином ці дослідження впливають на загальний розвиток галузі та які вони мають перспективи?

Такий якісний аналіз дозволить не лише визначити обсяг та напрямки досліджень у цій галузі, але й зрозуміти глибину та значимість наукових внесків, що формують майбутнє баштових кранів та їх оптимізації. Це надасть цінне розуміння поточного стану та можливих шляхів подальшого розвитку технологій та методів управління в галузі.

Tower crane motion optimization techniques

Аналіз статті Wu, K., García de Soto, B., & Zhang, F. (2020)[2] показує, що вона присвячена оптимізації руху баштових кранів у будівельних проєктах, за допомогою методу імітації відпалу. У статті пропонується просторово-часова модель планування, яка враховує завдання підйому та потенційні затримки.

Ефективність моделі демонструється на прикладі висотної будівлі, і результати показують, що оптимізовані рішення можуть забезпечити економію від 23.27% до 41.73% в порівнянні з первісними рішеннями.

Стаття "S. Dutta et al. (2020) in Automation in Construction 110 (2020) 102998"[3] досліджує розробку та впровадження модуля перепланування для автоматизації процесу підйому вантажів баштовими кранами в динамічному будівельному середовищі. Використовуючи комп'ютерно-асистовану систему планування підйому (CALP), ця робота зосереджується на оптимізації траєкторій підйому кранів, враховуючи динамічні перешкоди. Система використовує новий підхід для планування маршруту підйому, заснований на ієрархічному представленні орієнтованих обмежувальних коробок (OBV) для виявлення і класифікації перешкод, і використання дворівневої стратегії перепланування для забезпечення безпеки і ефективності операцій крану. Використовуючи детальні 3D моделі будівель та кранів, автори демонструють ефективність свого підходу

через низку кейс-стаді, підкреслюючи значення автоматизованого перепланування в сучасному будівництві.

Стаття "M Zhang et al. (2020) in Automation in Construction 119 (2020) 103342"[4] описує розробку адаптивного методу управління для баштових кранів

із зменшенням розгойдування вантажу. Цей метод заснований на нелінійній динамічній моделі крана з урахуванням параметричних невизначеностей.

Дослідження показує, що запропонований метод контролю ефективно знижує розгойдування вантажу та покращує загальну продуктивність управління,

порівняно з традиційними методами. Результати симуляцій демонструють

переваги нового підходу, особливо в плані підвищення точності позиціонування та зменшення розгойдування.

Стаття "Optimization of Tower Crane Location and Material Quantity Between Supply and Demand Points: A Comparative Study" авторів Ali Kaveh і Yasin

Vazirinia[5] зосереджується на оптимізації розташування баштових кранів та кількості матеріалів між точками постачання і попиту. У ній порівнюються різні

метаевристичні алгоритми для вирішення складних оптимізаційних завдань у будівництві, зокрема для ефективного розташування кранів на будівельному

майданчику.

Стаття "Automation and optimization in crane lift planning: A critical review" авторів Songbo Hu, Yihai Fang, і Yu Bai проводить критичний огляд літератури

щодо автоматизації та оптимізації в плануванні підйому вантажів баштовими кранами. Вона охоплює різні аспекти, включаючи вибір моделі крана,

планування розташування крана, планування шляху підйому, а також методи для багатокритеріального планування. Автори аналізують проблеми формулювання

та вирішення в контексті планування підйомів, вказуючи на потребу обміну інформацією та напрямки майбутніх досліджень у цій області[6].

НУБІП України

Стаття "Optimization of crane mechanisms to reduce vibration" авторства Stefan Chwastek [7] фокусується на оптимізації механізмів кранів для зниження вібрацій. У ній розглядається параметрична оптимізація механізмів крана, включаючи механізми повороту, балансування та підйому стріли, з метою мінімізації вібрацій навантаження та зменшення енергоспоживання.

Research studies on tower crane movement efficiency

Стаття "Dynamic Analysis of Tower Cranes" авторства Feng Ju та Yoo Sang Choo [8] зосереджується на динамічному аналізі баштових кранів. У ній розглядаються різні аспекти впливу динаміки на роботу кранів, включаючи вплив різних конструкційних елементів, таких як стріли і кабелі, на стабільність та ефективність кранів. Також у статті обговорюються методи для зменшення вібрації та підвищення безпеки під час роботи кранів.

Стаття "Location Optimization for a Group of Tower Cranes" авторства P. Zhang, F. C. Harris, P. O. Olomolaiye, та G. D. Holt [9] зосереджується на розробці комп'ютеризованої моделі для оптимізації розташування групи баштових кранів. Модель враховує критерії, такі як збалансоване навантаження роботи, мінімальна ймовірність конфліктів між кранами та висока ефективність операцій. Вона включає три підмоделі: ініціальне розташування кранів, коригування груп завдань для згладжування робочих навантажень та мінімізації конфліктів, і окрему оптимізацію для кожного крану для пошуку оптимального розташування з точки зору мінімального часу транспортування крока.

Стаття "Integrating 3D visualization and simulation for tower crane operations on construction sites" авторів M. Al-Hussein, M. Athar Niaz, H. Yu, H. Kim [10] досліджує інтеграцію 3D візуалізації та симуляції для операцій з баштовими кранами на будівельних майданчиках. Вона розкриває, як ця інтеграція може

покращити планування та виконання робіт з кранами, підвищуючи ефективність та безпеку операцій.

Стаття "Nonlinear Models for Predicting Hoisting Times of Tower Cranes" авторів C. M. Tam, Arthur W. T. Leung, та D. K. Liu[11] зосереджується на розробці та порівнянні лінійних та нелінійних моделей для прогнозування часу підйому вантажів баштовими кранами. Вона розглядає використання нейронних мереж та множинної регресії для поліпшення точності прогнозів у цій області.

Стаття "Tower cranes layout planning using agent-based simulation considering activity conflicts" авторства Ahmed Younes та Mohamed Marzouk[12] досліджує планування розташування баштових кранів за допомогою моделі агентного моделювання. Вона розглядає взаємодії та конфлікти між кранами, впливаючи на оптимізацію їх розташування та продуктивності на будівельних майданчиках.

Innovations in tower crane operational dynamics

Стаття "Virtual reality supported interactive tower crane layout planning for high-rise modular integrated construction" авторів Zhiqian Zhang та Wei Pan[13] розглядає використання віртуальної реальності для інтерактивного планування розташування баштових кранів у висотних модульних будівельних проектах.

Стаття описує розробку і оцінку інструменту VR, який дозволяє краще візуалізувати і планувати розміщення кранів, забезпечуючи більшу ефективність і безпеку в роботі кранів.

Стаття "Smart work packaging-enabled constraint-free path re-planning for tower crane in prefabricated products assembly process" авторів Xiao Li, Hung-lin Chi, Peng Wu, та Geoffrey Qiping Shen[14] розглядає розробку оптимізованої системи перепланування шляхів для баштових кранів, використовуючи інтелектуальні робочі пакети (Smart Work Packaging, SWP). Система зосереджується на управлінні обмеженнями та вдосконаленні шляхів підйому в

умовах змінних обмежень, характерних для процесу збірки префабрикованих виробів.

Стаття "Productivity and CO₂ emission analysis for tower crane utilization on high-rise building projects" авторів Shafiuл Hasan, Ahmed Bouferguene, Mohamed Al-Hussein, Patrick Gillis, та Avi Telyas[15] зосереджується на аналізі продуктивності та викидів CO₂ при використанні баштових кранів у висотному будівництві. У статті розглядається методологія вибору кранів, аналіз продуктивності та викидів CO₂, а також проводиться симуляція для валідації цих методів.

Стаття "A virtual prototyping system for simulating construction processes" авторства Ting Huang, C.W. Kong, H.L. Guo, Andrew Baldwin, та Heng Li[16] розглядає розробку віртуальної системи прототипування для симуляції будівельних процесів. Ця система використовує цифрові моделі будівель та тимчасових споруд, визначення будівельного обладнання, і симуляцію процесу для підвищення ефективності планування та управління будівельними проектами.

Стаття, яку ви надіслали для аналізу, називається "Advanced Simulation of Tower Crane Operation Utilizing System Dynamics Modeling and Lean Principles".

Авторами є Shafiuл Hasan, Mohamed Al-Hussein і Patrick Gillis[17]. Стаття зосереджена на розробці інтегрованої моделі системної динаміки з концепціями Lean для симуляції операцій з вежевим краном. Основна інновація полягає у використанні крана з двома стрілами, що потенційно може покращити продуктивність роботи крана.

Стаття "The Industrial Control of Tower Cranes: An Operator-in-the-Loop Approach" авторів Silvère Bonnabel та Xavier Claeys[18] зосереджується на розробці промислового керування баштовими кранами, в якому оператор залишається ключовим елементом управління системою. Це дослідження

важливе для підвищення продуктивності та безпеки кранових операцій, забезпечуючи ефективне взаємодію між автоматизованими системами та людськими операторами.

Comparative analysis of tower crane movement control systems

Стаття "Comparative assessment of anti-sway control strategy for tower crane system" авторів Reza Ezuan Samin та Zaharuddin Mohamed [19] зосереджується на дослідженні системи баштового крану, з акцентом на кут розгойдування вантажу.

Автори застосовують традиційні та інтелектуальні контролери, розроблені з використанням другого закону Ньютона, і проводять моделювання в середовищі MATLAB/Simulink. Вони представляють результати симуляції в контексті здатності траєкторії візка та зменшення кута розгойдування вантажу, а також обговорюють вплив різної довжини мотузки та маси вантажу на продуктивність крану.

Стаття "Control strategies for crane systems: A comprehensive review" авторів Liyana Ramli, Z. Mohamed, Auwalu M. Abdullahi, H.I. Jaafar та Izzuddin M. Lazim [20] презентує всебічний огляд стратегій управління різними типами кранових систем. Основна увага приділяється огляду схем управління для різних типів кранових систем, що були реалізовані у 21 столітті. Особливо розглядаються моделювання одно- та двомаятникових кранових систем. В статті також описані антирозгойдувальні системи управління для промислових кранів, які доступні на ринку. Автори підсумовують більшість пов'язаних досліджень і зосереджуються на тенденціях досліджень щодо управління крановими системами.

Стаття "A hybrid evolutionary algorithm for recurrent neural network control of a three-dimensional tower crane" авторів Sam Chau Duong, Eiho Uezato, Hiroshi Kinjo та Tetsuhiko Yamamoto [21] досліджує управління тривимірною системою баштового крану за допомогою рекурентної нейронної мережі (RNN), яка

оптимізована за допомогою еволюційного алгоритму. Стаття вводить гібридний еволюційний алгоритм (HEA), який використовує оператори PSO (Particle Swarm Optimization) та GA (Genetic Algorithm) для покращення процесу еволюції RNN.

Результати симуляцій показують перевагу запропонованого HEA у порівнянні з канонічними алгоритмами та ефективність контрольної системи. Автори також обговорюють підхід до управління краном із врахуванням обмежень та демпфірування, які часто не враховуються в літературі.

Стаття "Control of a Jib-Type Crane Mounted on a Flexible Structure" авторів Kiyoshi Takagi та Hidekazu Nishimura[22] фокусується на моделюванні та

контролі крана, встановленого на гнучкій вежоподібній структурі. Основною метою дослідження є контроль розгойдування вантажу та вібрації гнучкої структури за допомогою внутрішніх можливостей баштового крана. Автори

реалізували децентралізований контроль, що складається з двох окремих контролерів, і описують дизайн централізованої системи контролю, враховуючи зв'язок між керуванням у вгору-вниз (крен стріди) і ротаційним напрямками.

Вони демонструють, що децентралізована система контролю має майже ту саму продуктивність та стабільність, що і централізована, і є ефективною для управління баштовим краном.

Стаття "Modeling and Control of Tower Cranes with Elastic Structure" авторів Florentin Rauscher та Oliver Sawodny[23] зосереджена на детальному моделюванні та контролі баштових кранів з еластичною структурою. Вони розглядають крани

з гнучкими конструкціями, використовуючи динамічну модель багатотілесної системи, що припускає як лінійну динаміку малих еластичних деформацій, так і

нелінійні ефекти великих рухів твердого тіла. Розроблена модель дозволяє активно гасити коливання вантажу, використовуючи дворівневу систему контролю, що складається з нелінійного передавального контролера, заснованого

на плоскості, і регулятора лінійної квадратичної оцінки з програмованим

посиленням. Експериментальні результати на повномасштабному баштовому крані підтверджують точність моделі та ефективність запропонованого концепту антирозгойдувального контролю.

Стаття "Tower Crane Cycle Times: Case Study of Remote-Control versus Cab-

Control Operation" авторів Aviad Shapira та Avihu Elbaz[24] проводить детальне

порівняння часу циклів роботи баштового крану при дистанційному та кабінному управлінні. Дослідження зосереджено на визначенні, чи існують відмінності у

часі циклів крана в залежності від способу управління, та на вивченні різних

аспектів безпеки та здоров'я операторів. Автори проводять детальний аналіз

впливу різних параметрів на продуктивність крана, таких як швидкість роботи,

умови праці, безпека, та інші. Вони виявили, що існують певні умови, за яких

обидва способи управління можуть давати однаковий час циклу або навіть

надавати перевагу дистанційному управлінню. Це дослідження важливе для

професіоналів у будівництві, які відповідають за вибір способу управління

краном на своїх проєктах, та також для вчених, які займаються дослідженнями

роботи кранів.

Стаття "Combination of Data-Driven Active Disturbance Rejection and Takagi-

Sugeno Fuzzy Control with Experimental Validation on Tower Crane Systems" авторів

Raul-Cristian Roman, Radu-Emil Precup, Emil M. Petriu, та Florin Dragan[25]

висвітнює розробку та валідацію двох нових структур контролю для систем

баштових кранів. Ці структури поєднують в собі контроль з використанням

методу відкидання активних збурень (Active Disturbance Rejection Control,

ADRC) з пропорційно-диференціальним контролем на основі логіки Такагі-

Сугено (PDTSF). Дослідження порівнює ці структури з традиційними методами

ADRC, використовуючи реальні експерименти на нелінійній лабораторній

установці баштового крану. Результати підтверджують, що нові методи

контролю ефективно керують позицією візка та кутовим положенням руки крану, водночас поліпшуючи енергетичну ефективність.

НУБІП України

Висновки до розділу 2:

1) Виявлено стійке зростання інтересу до оптимізації руху баштових кранів з 2019 по 2023 рік. Це зростання відображається у підвищенні кількості пошукових запитів у цій області, що вказує на активність досліджень і розвитку технологій.

НУБІП України

2) Найбільше зростання інтересу відзначено у сфері "Технік оптимізації руху баштових кранів", що свідчить про збільшення зосередження на ефективності та безпеці цих машин. З іншого боку, "Дослідження ефективності руху баштових кранів" показує коливання інтересу, вказуючи на змінні пріоритети в галузі.

3) Спостерігається зростання інтересу до "Інновацій у динамічній експлуатації баштових кранів" і "Порівняльного аналізу систем управління рухом баштових кранів". Однак ці категорії залишаються менш популярними в порівнянні з іншими, що може свідчити про нішевий характер цих напрямків досліджень.

НУБІП України

4) Виявлені тенденції надають важливий орієнтир для розуміння поточного стану та напрямків розвитку в області оптимізації руху баштових кранів.

Це має ключове значення для формування стратегій розвитку, впровадження інновацій та підходів у сфері будівництва.

НУБІП України

НУБІП України

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА МЕТОДІВ ОПТИМІЗАЦІЇ ДЛЯ КООРДИНОВАНОГО РУХУ МЕХАНІЗМІВ БАШТОВОГО КРАНА

3.1 Аналіз та оцінка результатів першого наближення в побудові законів руху механізмів баштового крана

У контексті роботи основна увага приділяється оптимізації руху механізму баштового крана, а важливим змістом є аналіз та розуміння основних принципів роботи механізму. У цьому контексті механізм визначається як система, призначена для перетворення та керування рухом, що складається з рухомих і нерухомих компонентів. У баштовому крані ці компоненти працюють разом, щоб забезпечити точне та ефективне переміщення вантажу.

Важливим етапом оптимізації є встановлення точних координат руху крана, включаючи початкову та кінцеву точки траєкторії руху вантажу. Для такого крана, як Liebherr 71 EC, це може включати визначення координат таким чином, що початкова точка траєкторії знаходиться на $x_0=19$ м, $y_0=16$ м, а кінцева точка — на $x_{fin}=8$ м, $y_{fin}=22$ м. Ці дані мають вирішальне значення для моделювання рухів крана та планування найкращого способу переміщення вантажу.

Метою цього типу моделювання є мінімізація довжини траєкторії та забезпечення максимально ефективною та безпечною роботою крана. Ефективне керування траєкторією руху крана дозволяє оптимізувати час роботи та забезпечити високий рівень безпеки, що є основним завданням магістерської роботи. Розробка оптимальних стратегій руху баштового крана відіграє ключову роль у підвищенні продуктивності та безпеки на будівельних майданчиках. Вище наведені координати дають нам змогу побудувати графік розміщення відповідних точок (рис. 3.1).

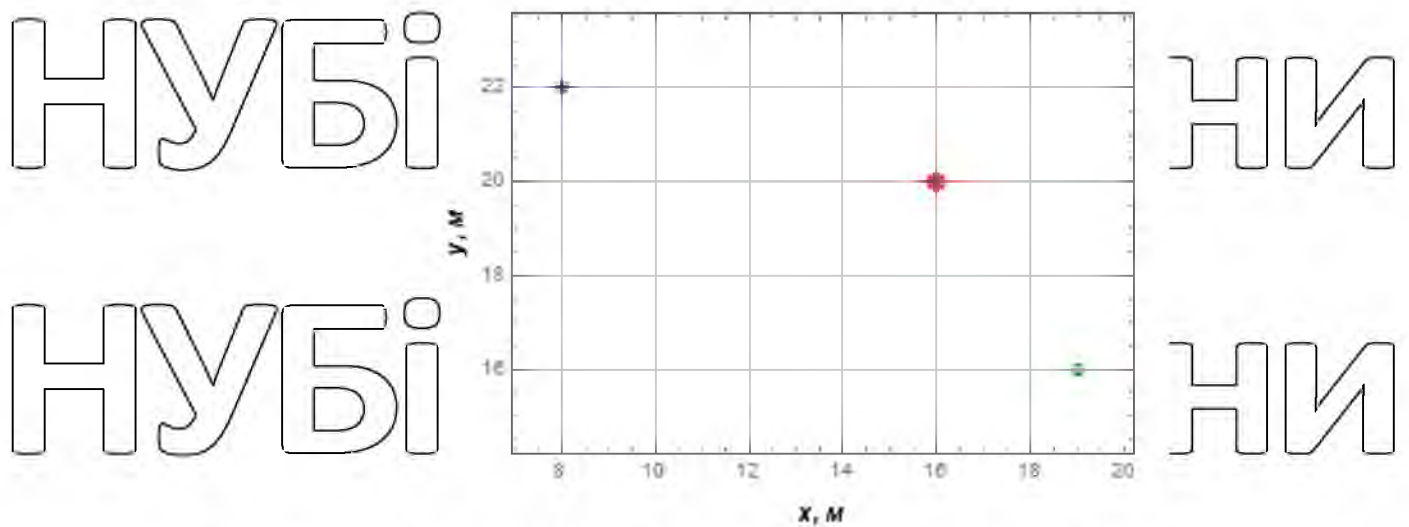


Рисунок 3.1 – Візуалізація основних елементів траєкторії переміщення вантажу баштовим краном: початкова точка траєкторії (позначена зеленим), кінцева точка траєкторії (позначена синім) та точка, що ілюструє ключову позицію на траєкторії (позначена червоним)

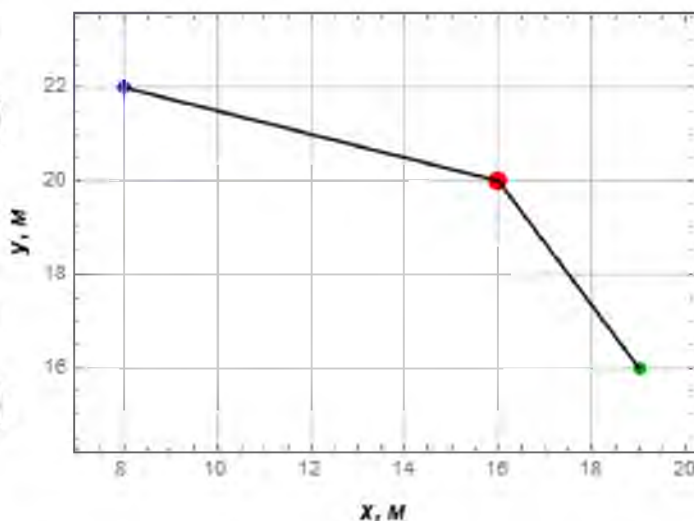
На другому етапі роботи зосереджуємося на розробці траєкторії переміщення вантажу краном у першому наближенні. Враховуючи координати ключових точок, оптимальним варіантом для мінімізації довжини траєкторії є використання двох прямолінійних відрізків. Ці ділянки можна описати за допомогою відповідних функцій, що представляють собою лінійні рівняння;

$$y_{first\ part} = y_{obs} + (y_0 - y_{obs}) \cdot \frac{x_{obs} - x}{x_{obs} - x_0} \quad (3.1)$$

$$y_{sec\ part} = y_{fin} + (y_{obs} - y_{fin}) \cdot \frac{x_{fin} - x}{x_{fin} - x_{obs}} \quad (3.2)$$

Надалі представимо отримані результати за допомогою графіків (рис. 3.2).

НУБ



їни

НУБ

їни

Рисунок 3.2 Візуалізація траєкторії переміщення вантажу баштовим краном.

НУБІП України

У третьому етапі роботи, присвяченому оптимізації руху механізмів баштового крана, фокусуємося на дискретизації ключових ділянок траєкторії руху вантажу. Дискретизація полягає у перетворенні неперервних функцій на функції дискретних змінних, дозволяючи точно відновити вихідні функції з заданою точністю. Цей процес включає визначення квантованих значень у дискретній шкалі координат.

НУБІП України

Для реалізації цього процесу на ділянках траєкторії (3.1) та (3.2), спочатку потрібно визначити довжину кожної з ділянок. Використання теореми Піфагора дозволяє обчислити ці довжини, які є важливими для точного відображення траєкторії руху вантажу:

довжина першої ділянки:

$$L_1 = \sqrt{(x_{obs} - x_0)^2 + (y_{obs} - y_0)^2} = \sqrt{(16 - 19)^2 + (20 - 16)^2} = 5,000 \text{ м}$$

(3.3)

довжина другої ділянки:

НУБІП України

$$L_2 = \sqrt{(x_{fin} - x_{obs})^2 + (y_{fin} - y_{obs})^2} = \sqrt{(8 - 16)^2 + (22 - 20)^2} = 8,246 \text{ м}$$

(3.4)

У рамках забезпечення високої точності відображення траєкторії руху вантажу баштового крана, встановлюємо параметри дискретизації з кроком 1 мм на кожен метр траєкторії, що відповідає кількості дискретних точок $n=1000$ на метр. Це дозволяє точно відображати траєкторію, сприяючи точному управлінню краном і підвищенню ефективності роботи.

Виходячи з визначених довжин кожної з ділянок траєкторії, можемо обчислити загальну кількість дискретних точок, які необхідні для кожної ділянки. Наприклад, для першої ділянки загальна кількість дискретних точок складе 5000, а для другої - 8246. Це дозволяє детально описати рух вантажу по траєкторії, що є ключовим для точного моделювання та аналізу руху вантажу баштовим краном.

Як результат процесу дискретизації, були отримані координати для кожної точки вздовж траєкторії руху вантажу баштового крана. Ці координати охоплюють всю довжину траєкторії, забезпечуючи детальний опис руху. Проте, у даній роботі від графічного представлення цих результатів буде утримано, оскільки через значну кількість точок на траєкторії, візуально воно не вноситиме суттєвої різниці порівняно із зображенням на рис. 3.2. Важливість цих даних полягає у можливості точного аналізу та планування руху вантажу, що сприяє досягненню цілей магістерської роботи з оптимізації роботи баштових кранів.

Із використанням виразів (3.1) та (3.2) отримано координати точок на траєкторії руху вантажу. Їх можна представити у наступному вигляді:

$$P_i(x_i, y_i), i \in \{0..n\} \quad (3.5)$$

Після завершення процесу дискретизації траєкторії руху вантажу баштового крана, наступним кроком є розрахунок узгоджених положень візка та стріли крана. Це передбачає перехід від декартових координат, які представляють

положення вантажу в робочій зоні крана, до полярних координат, які безпосередньо пов'язані з механізмами баштового крана.

Розрахунок полягає у визначенні лінійної координати візка вздовж стріли та кутової координати стріли крана (її повороту). Для цього використовуються формули, які перетворюють декартові координати у полярні, вважаючи, що початки обох координатних систем співпадають.

$$r_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \quad (3.6)$$

$$\varphi_i = \arctg\left(\frac{x_i}{y_i}\right) \quad (3.7)$$

де r_i та φ_i – дискретні координати положення візка на стрілі (відносно осі її обертання) та кутове положення стріли.

В результаті отримуємо масиви положень візка та стріли, що дозволяє візуалізувати їх рух на графіку (рис. 3.3). Далі, на основі отриманих дискретних положень візка та стріли, проводимо розрахунок їх дискретних швидкостей, використовуючи поліноміальний фільтр Савицького-Голея. Це дає змогу точно визначити динаміку руху кожного з механізмів, що відображено на графіку руху швидкостей (рис. 3.4).

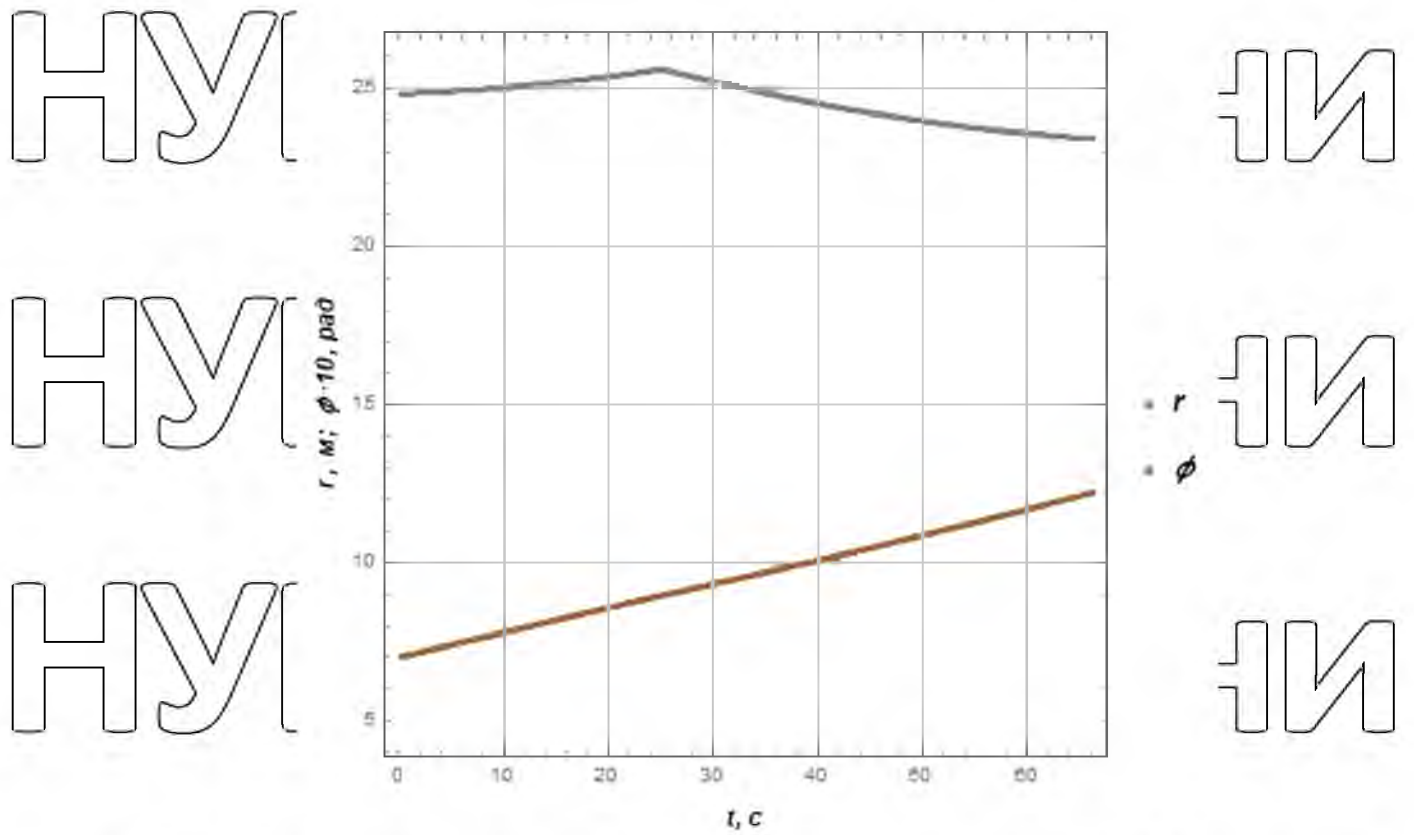


Рисунок 1.3 – Графік лінійного положення візка та кутового положення стріли баштового крана

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

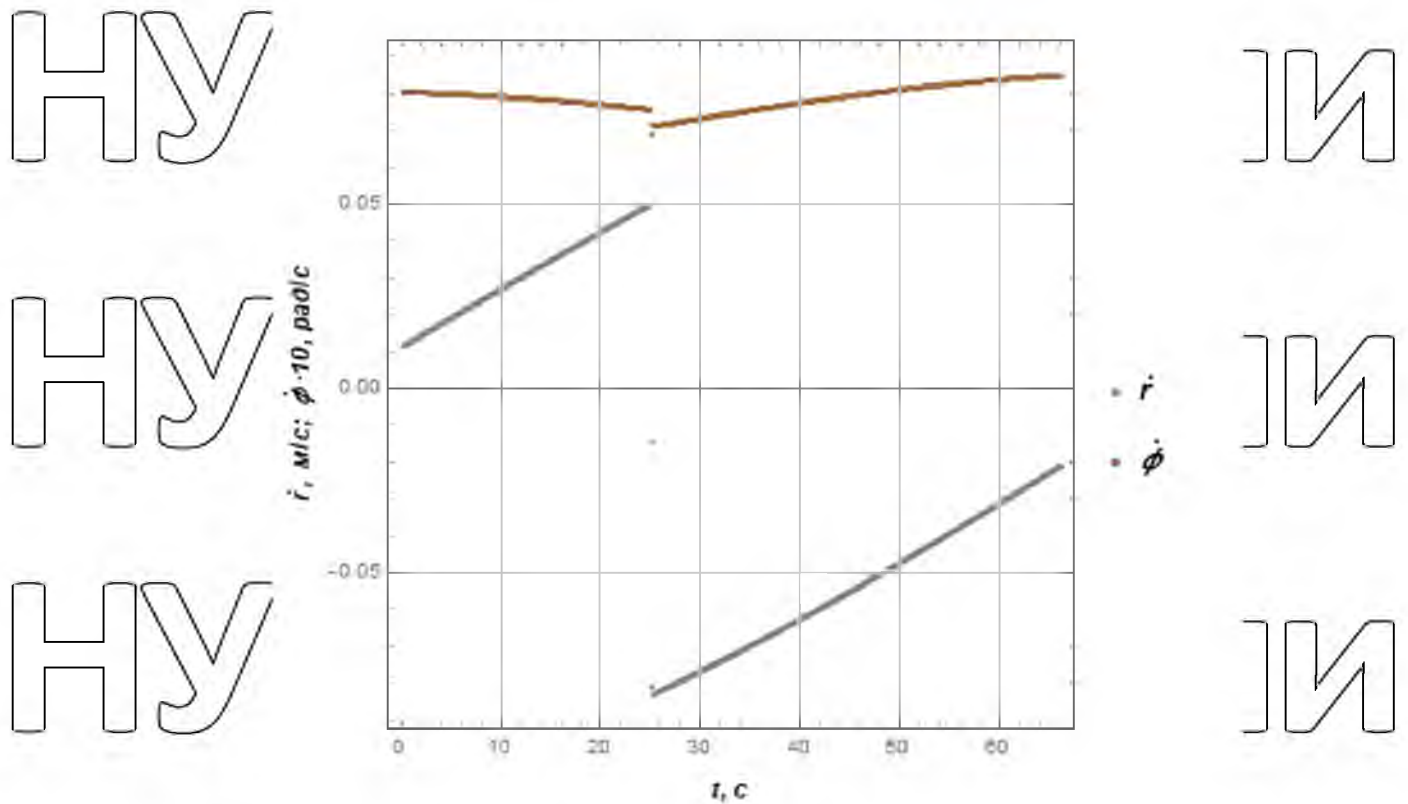


Рисунок 2.4 – Графік лінійної швидкості руху візка та кутової швидкості повороту стріли баштового крана

Проведені розрахунки для оптимізації руху механізмів баштового крана, що відповідають за виліт вантажу та поворот крана, показали, що первинно запропоновані закони руху не відповідають вимогам практичного застосування.

Аналіз динаміки швидкостей, згідно з графіком (рис. 3.4), виявив проблеми з плавністю зміни швидкості: відзначено неприпустимий ривок на старті та нереалістичне збільшення швидкості механізму зміни вильоту вантажу. Також помічено неприродне зниження швидкості при маневруванні в обхід перешкоди, що вказує на недоліки у моделі руху.

Зміна знаку швидкості руху візка, що вказує на розворот, є недопустимою з точки зору безпеки та ефективності експлуатації крана. Отже, існує вага потреба в усуненні проблем у швидкісних профілях обох механізмів.

Для досягнення надійної та безпечної роботи крана потрібно виконати детальний аналіз та оптимізацію моделі руху. Важливим аспектом є забезпечення гладкості швидкісних функцій та їхньої координати, особливо в критичних точках траєкторії, таких як (xobs, yobs). Це вимагатиме ретельної настройки параметрів траєкторії та можливої модифікації законів управління для забезпечення ефективної та безаварійної роботи.

3.2 Розвиток та удосконалення законів руху у другому наближенні

У процесі побудови законів руху механізмів зміни вильоту вантажу та повороту крана в першому наближенні виявлено, що траєкторія руху вантажу складається з двох прямолінійних ділянок. Перша ділянка відображає рух вантажу до перешкоди, а друга - після неї. Однак, сполучення цих ділянок під певним кутом створює проблему у їхній реалізації на практиці.

Задачею другого наближення є корекція другої ділянки таким чином, щоб вона сполучалася з першою ділянкою під кутом 180 градусів. Це дозволить забезпечити плавний та реалістичний рух вантажу.

Для визначення кута між цими ділянками необхідно розрахувати тангенси кутів нахилу обох ділянок. Розрахунки тангенсів кутів нахилу для першої та другої ділянок можуть бути здійснені використовуючи відповідні математичні формули. Це дозволить точно визначити кут між ділянками траєкторії та відповідно скоригувати напрямок другої ділянки для забезпечення плавного та реалістичного руху вантажу:

для першої ділянки руху вантажу:

$$k_1 = \frac{y_{obs} - y_0}{x_{obs} - x_0} \quad (3.8)$$

для другої ділянки руху вантажу:

$$k_2 = \frac{y_{fin} - y_{obs}}{x_{fin} - x_{obs}} \quad (3.9)$$

Далі отримаємо кут між двома прямими:

$$\alpha = \arctg \left(\frac{k_1 - k_2}{1 + k_1 \cdot k_2} \right). \quad (3.10)$$

На даному етапі роботи ми визначаємо тангенс кута нахилу для ділянки спряження, яка використовується замість другої ділянки руху вантажу. Цей крок необхідний для спрощення та вдосконалення траєкторії руху вантажу, зокрема, для плавного сполучення цієї ділянки з першою.

$$tg(\tilde{\alpha}) = tg \left(\pi - \text{Arctg} \left(\frac{k_1 - k_2}{1 + k_1 \cdot k_2} \right) \right) = \frac{x_{obs}(y_0 - y_{fin}) + x_0(y_{fin} - y_{obs}) + x_{fin}(-y_0 + y_{obs})}{(x_0 - x_{obs})(x_{fin} - x_{obs}) + (y_0 - y_{obs})(y_{fin} - y_{obs})}. \quad (3.11)$$

Далі, основна задача полягає у визначенні нового закону руху для другої ділянки, який забезпечуватиме плавне з'єднання з першою ділянкою. Для цього розглядається розв'язок відповідної крайової задачі. У цій задачі L_2 представляє довжину другої ділянки, яка була визначена у першому наближенні.

$$\begin{cases} y_2(x) = 0, \\ y_2(0) = 0, \dot{y}_2(0) = tg(\tilde{\alpha}), \ddot{y}_2(0) \neq 0, \\ y_2(L_2) = 0, \dot{y}_2(L_2) = 0, \ddot{y}_2(L_2) = 0, \end{cases} \quad (3.12)$$

де L_2 – довжина другої ділянки у першому наближенні ($L_2 = \sqrt{(x_{fin} - x_{obs})^2 + (y_{fin} - y_{obs})^2}$). Вибір цієї крайової задачі обумовлений потребою забезпечення необхідних умов руху на другій ділянці траєкторії. Зокрема, це включає умову, за якою перша і друга ділянки будуть з'єднуватися під кутом 180 градусів, а рух до кінцевої точки (місця доставки вантажу) відбуватиметься плавно.

Розв'язання цієї крайової задачі дає можливість точно визначити параметри руху на другій ділянці, забезпечуючи необхідні умови для практичної реалізації цього руху. Це сприяє досягненню цілей магістерської роботи, спрямованих на оптимізацію та підвищення ефективності роботи баштових кранів.

$$y_2 = \operatorname{tg}(\alpha) \cdot x + \frac{x^2(-3x^2 + 8xL_2 - 6L_2^2)}{L_2^4} \quad (3.13)$$

В результаті проведених розрахунків за формулами, друга прямолінійна ділянка була замінена на уточнену ділянку, яка відповідає вимогам практичної реалізації руху вантажу. На рис. 3.5 наведено графічне зображення цієї оновленої ділянки.

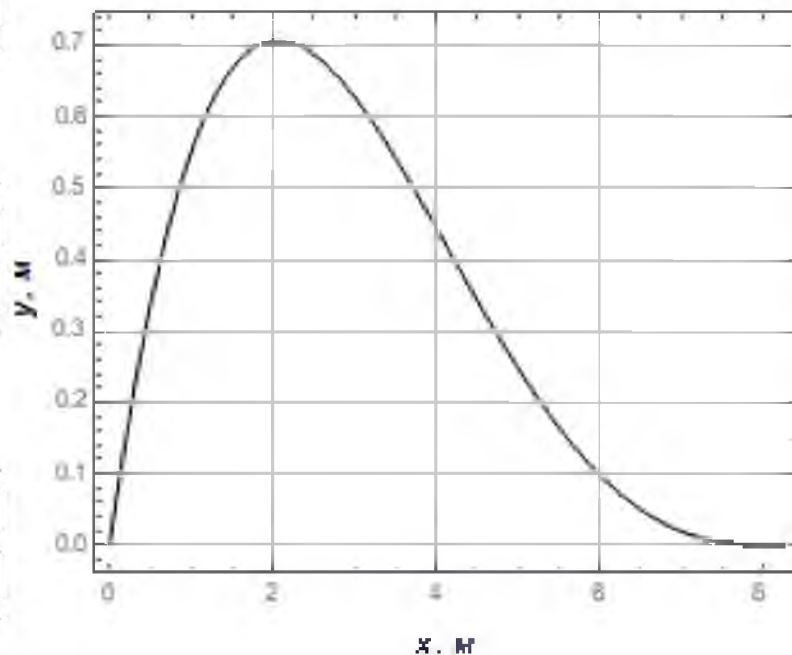


Рисунок 3.5 – Графічне зображення закону руху в другій половині ділянки

Далі отриману другу ділянку потрібно поєднати з першою ділянкою. Однак, з рисунку 3.5 видно, що для цього необхідно повернути ділянку. Для зміни її напрямку здійснюємо дискретизацію другої уточненої ділянки, а потім вектори, що описують координати дискретних точок траєкторії, множимо на матрицю повороту. Це дозволить отримати ділянку, повернуту на необхідний кут

$$\begin{bmatrix} x_{2,i, \text{уточ}} \\ y_{2,i, \text{уточ}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{2,i} \\ y_{2,i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\operatorname{arctg}(k_2)) & \sin(\operatorname{arctg}(k_2)) \\ -\sin(\operatorname{arctg}(k_2)) & \cos(\operatorname{arctg}(k_2)) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{\text{obs}} \\ y_{\text{obs}} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

де $x_{2,i,уточ}$ та $y_{2,i,уточ}$ – координати уточненої траєкторії, що повернута на кут $\arctg(k_2)$ та віднесена у точку спряження ділянок (розміщення перешкоди).

На наступному етапі ми зосереджуємося на дискретизації траєкторії руху вантажу баштового крана. Відповідно до пункту 2.1, де була проведена дискретизація первинних ділянок, перша ділянка траєкторії залишається незмінною. Однак, друга ділянка траєкторії, яка була замінена на нову уточнену ділянку, потребує додаткових розрахунків.

Для визначення довжини цієї нової ділянки траєкторії застосовуємо теорему Піфагора. Застосування цієї теореми дозволяє точно обчислити довжину другої ділянки, виходячи з відомих координат кінцевих точок цієї ділянки. Формули, які будуть використані для цих розрахунків, дозволяють точно визначити реальні виміри траєкторії, що є критично важливим для досягнення точності та плавності руху вантажу.

$$L_{2,уточ} = \int_0^{L_2} \sqrt{1 + (j_z(x))^2} dx = 8,465 \text{ м} \quad (3.15)$$

При визначенні ділянок траєкторії руху вантажу баштового крана, для забезпечення високої точності відображення, встановлено кількість точок дискретизації на один метр траєкторії. Цей крок дискретизації встановлено рівним 1 мм, що відповідає $n=1000$ точкам на метр. За таких умов, для першої ділянки, яка залишилася незмінною, кількість дискретних точок складає 5000, а для другої, уточненої ділянки – 8465.

Графічне представлення цих результатів відображено на рис. 3.6, де подано першу ділянку траєкторії, яка не зазнала змін, та другу ділянку, яка була модифікована. Це візуалізує процес вдосконалення траєкторії руху вантажу, який включає заміну однієї з основних ділянок з метою покращення загальної ефективності та реалізованості руху вантажу.

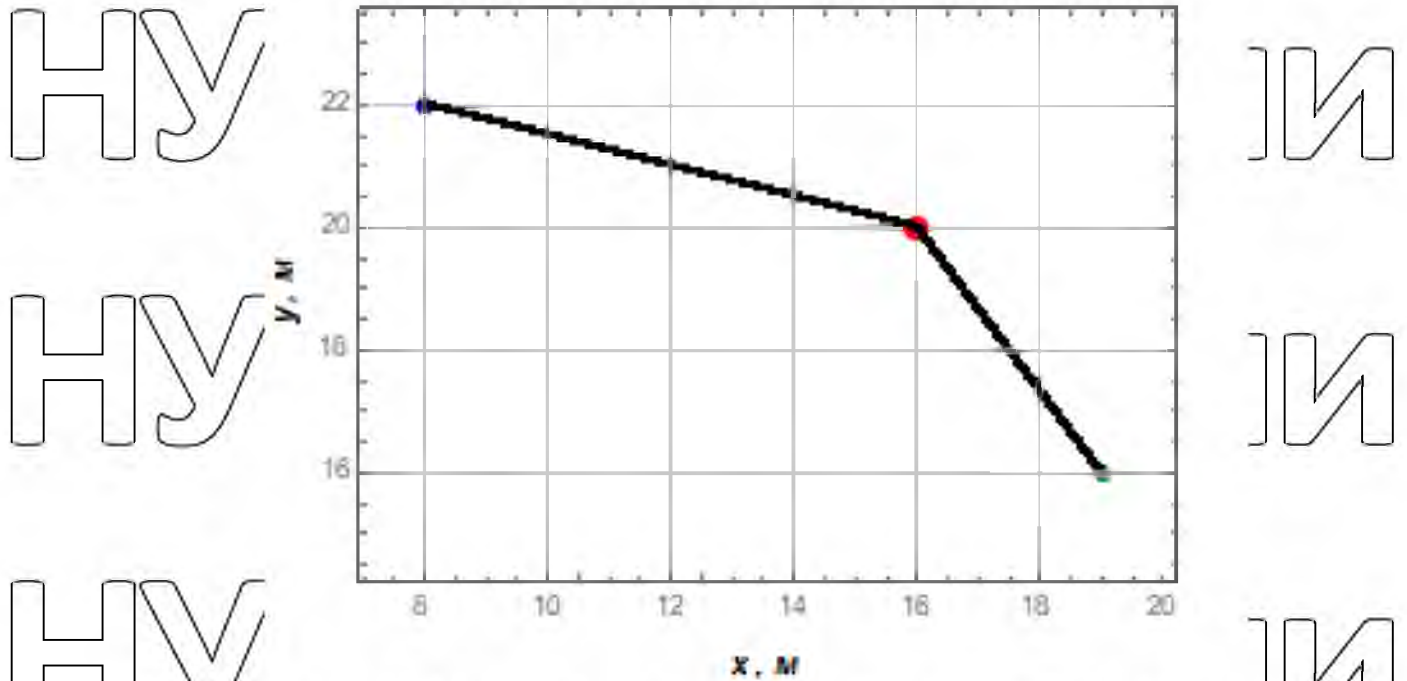


Рисунок 3.6 – Графічне зображення траєкторії руху вантажу

Наступним важливим кроком у процесі оптимізації руху баштового крана є розрахунок законів керування механізмів повороту крана та переміщення візка. Цей етап базується на вже визначених загальних характеристиках руху вантажу по траєкторії, які були задані раніше:

- Швидкість руху вантажу по траєкторії (v) становить 0,2 м/с.
 - Крок дискретизації за часом (Δt) встановлено на рівні 0,1 секунди.
- Загальна тривалість руху по траєкторії визначається за формулою:

$$T_{заг} = \frac{L_{заг}}{v} = \frac{L_1 + L_{2, уточ}}{v} = \frac{14,431}{0,2} = 72,155 \text{ с} \quad (3.16)$$

де $L_{заг}$ – загальна довжина траєкторії руху вантажу у другому наближенні. Виходячи з розрахованої тривалості руху, можемо визначити кількість точок дискретизації n та положення вантажу на траєкторії:

$$n = \frac{T_{заг}}{\Delta t} = \frac{72,155}{0,1} \approx 722 \quad (3.17)$$

Після завершення первинних розрахунків, наступним кроком є визначення узгоджених положень візка та стріли баштового крана. Цей процес, вимовний аналогічно до того, що було зроблено у пункті 3.1, включає розрахунок лінійної координати візка вздовж стріли та кутової координати повороту стріли.

В результаті цих розрахунків отримано масиви, що відображають положення візка та стріли крана, і ці дані були представлені на рис. 3.7. Це дозволяє візуально оцінити положення цих елементів крана в різні моменти часу відповідно до заданої траєкторії руху.

Далі, з метою визначення швидкостей руху механізмів крана, були проведені розрахунки дискретних значень швидкостей візка та стріли. Для цього було застосовано поліноміальний фільтр Савицького-Голця, який дозволяє згладити дані та визначити швидкість з високою точністю. Розраховані дискретні швидкості механізмів були представлені на графіку (рис. 3.8).

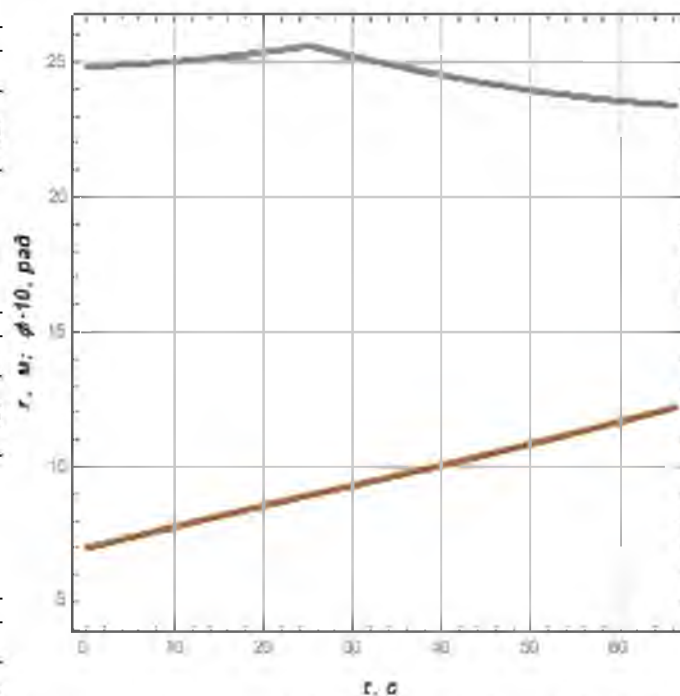


Рисунок 3.7 – Графік положення візка та кутового положення стріли баштового крана

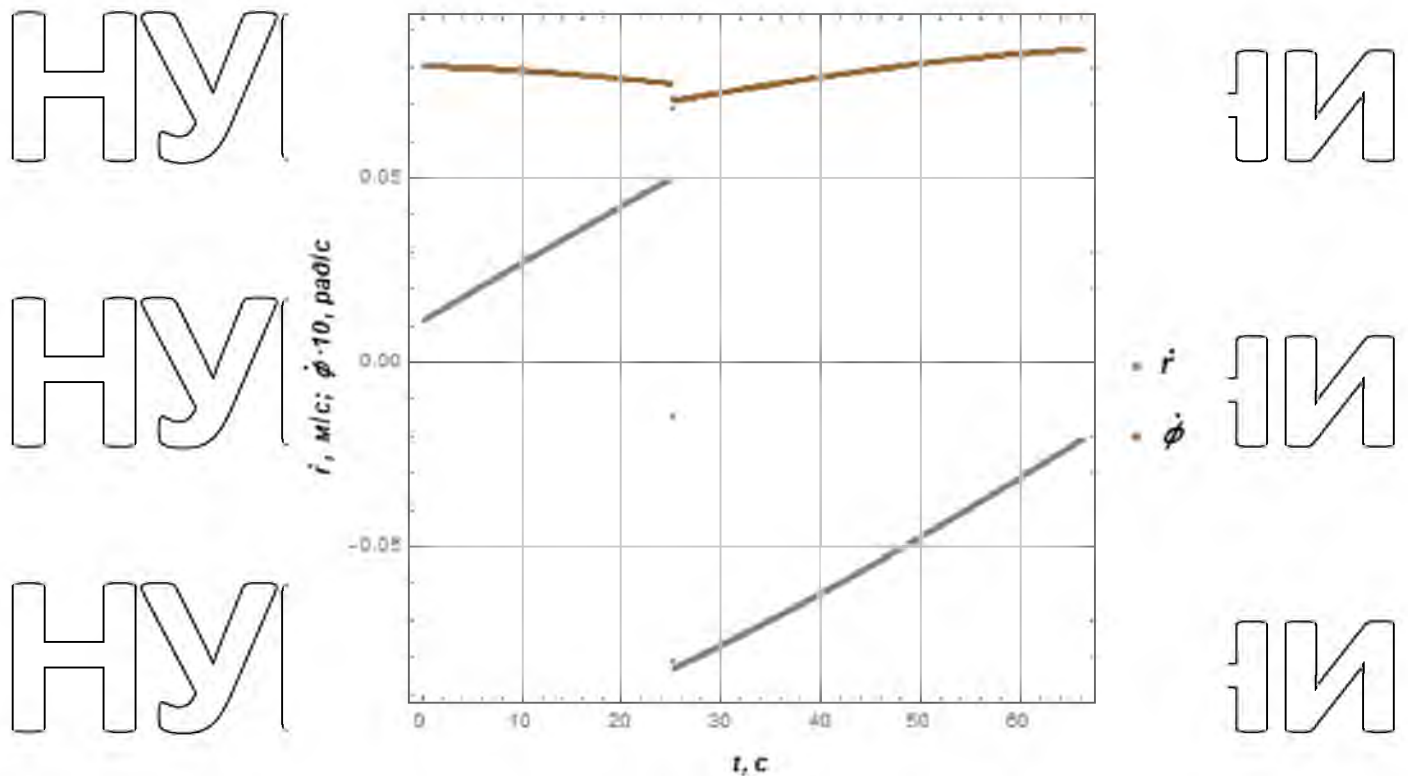


Рисунок 3.8 – Графік швидкості руху візка та повороту стріли баштового крана

Підсумовуючи, можна стверджувати, що було виконано дві важливі вимоги до поліпшення закону руху вантажу: траєкторія руху тепер є більш плавною, без кутів спряження, і значно зменшилась різниця швидкостей візка. Проте, збільшення розриву швидкості повороту стріли є негативним аспектом, що вимагає додаткових досліджень та оптимізації у подальшій роботі. Отже, хоча було досягнуто деякого прогресу, існує потреба у подальшому удосконаленні та аналізі розробленого закону руху.

3.3 Інтеграція та оцінка ефективності удосконалених законів руху в третьому наближенні

У процесі оптимізації сумісного руху механізмів баштового крану для переміщення вантажу по заданій траєкторії, було розроблено дискретну траєкторію руху вантажу у першому і другому наближеннях. На цій траєкторії

вибрано специфічні ділянки та визначено кількість дискретних точок для забезпечення плавного переходу між ними. Щоб досягти цієї плавності, було використано понижену швидкість руху вантажу при проходженні точок спряження.

Аналіз графіків швидкостей механізмів показав, що спостерігається миттєвий розгін і гальмування, що суперечить фізичним особливостям реального процесу переміщення вантажу. Відповідно, було вирішено ввести перехідні процеси тривалістю 4 секунди кожен для реалізації більш природнього руху.

Всього у процесі переміщення вантажу по траєкторії було передбачено чотири таких перехідних процеси: розгін, зниження швидкості, повторний розгін і зупинка.

Подальші розрахунки, проведені з урахуванням цих оновлених вимог, дозволяють визначити загальну довжину траєкторії, яка пройдена під час цих перехідних процесів. Такий підхід сприяє підвищенню точності та ефективності сумісного руху механізмів баштового крана

Далі проводимо розрахунки з використанням оновлених вимог. Загальна довжина траєкторій, яка буде пройдена на перехідних процесах визначається таким чином:

$$L_{пер} = 2 \cdot \frac{v \cdot t_1}{2} + 2 \cdot \frac{(v + v_{min}) \cdot t_1}{2} = 2 \cdot \frac{0,2 \cdot 4}{2} + 2 \cdot \frac{(0,2 + 0,1) \cdot 4}{2} = 2 \text{ м} \quad (3.18)$$

де t_1 – тривалість перехідного процесу ($t_1 = 4$ с).

При аналізі руху вантажу баштового крана з урахуванням змінної швидкості виявлено ключову особливість: коли вантаж переходить з номінальної швидкості на понижену, він проходить більшу відстань, ніж у випадку зниження швидкості до повної зупинки. Цей феномен виникає через те, що вантаж не припиняє рух повністю, а замість цього продовжує рухатися, хоч і з меншою швидкістю.

Для точного визначення загальної тривалості руху по траєкторії з урахуванням змінної швидкості, проводяться специфічні розрахунки. Ці розрахунки дозволяють врахувати час, який вантаж проводить у русі з різними швидкостями, і таким чином, забезпечити більш точне моделювання реального руху вантажу.

Визначаємо загальну тривалість руху по траєкторії, при умові, що рух виконується із змінною швидкістю:

$$T_{заг} = \frac{L_{заг} - L_{пер}}{v} + T_{пер} = \frac{14,431 - 2}{0,2} + 16 = 78,155 \text{ с} \quad (3.19)$$

Загальна тривалість перехідних процесів складе:

$$T_{пер} = 4 \cdot t_1 = 4 \cdot 4 = 16 \text{ с} \quad (3.20)$$

Надалі можемо визначити кількість точок дискретизації u положення вантажу на траєкторії його руху:

$$u = \frac{T_{заг}}{\Delta t} = \frac{78,155}{0,1} = 781,55 \approx 782. \quad (3.21)$$

Наступний етап розрахунків полягає у визначенні окремих моментів часу, які відповідають змінам швидкості руху вантажу. Момент переходу з номінальної швидкості на проміжну:

$$t_2 = \frac{v \cdot t_1}{2} + \frac{(v + v_{min}) \cdot t_1}{2} + t_1 = \frac{0,2 \cdot 4}{2} + \frac{(0,2 + 0,1) \cdot 4}{2} + 4 = 29,415 \text{ с} \quad (3.22)$$

Момент досягнення проміжної швидкості:

$$t_3 = t_2 + t_1 = 29,415 + 4 = 33,415 \text{ с} \quad (3.23)$$

Момент закінчення розгону з проміжної швидкості до номінальної:

$$t_4 = t_3 + t_1 = 33,415 + 4 = 37,415 \text{ с} \quad (3.24)$$

Момент початку гальмування з номінальної швидкості до зупинки:

$$t_5 = T_{заг} - t_1 = 78,155 - 4 = 74,155 \text{ с}. \quad (3.25)$$

Для того, щоб реалізувати змінний характер швидкості руху вантажу по траєкторії, який дасть змогу забезпечити розгін, гальмування та зміну швидкості вантажу, запишемо формулу зміну кроку переміщення вантажу між дискретними моментами часу:

$$\Delta s \approx \begin{cases} \frac{nt^2(-2t+3t_1)v\Delta t}{t_1^3}, t_1 \geq t > 0; \\ n \cdot v \cdot \Delta t, t_2 \geq t > t_1; \\ \frac{1}{(t_2-t_3)^3} n \left((t-t_2)^2(2t-3t_2+t_3)v + (t-t_2)^2(2t+t_2-3t_3)v_{\min} \right) \Delta t, t_3 \geq t > t_2; \\ \frac{1}{(t_3-t_4)^3} n \left((t-t_3)^2(2t+3t-3t_4)v + (t-t_4)^2(2t-3t_3+t_4)v_{\min} \right) \Delta t, t_4 \geq t > t_3; \\ n \cdot v \cdot \Delta t, t_5 \geq t > t_4; \\ \frac{n(t-T)^2(2t+T-3t_5)v\Delta t}{(T-t_5)^3}, T \geq t > t_5, \end{cases} \quad (3.26)$$

де Δs – крок переміщення вантажу протягом часу Δt ; t_2 – моменту переходу від номінальної швидкості на проміжну швидкість, t_3 – момент досягнення проміжної швидкості; t_4 – моменту переходу від проміжної швидкості на номінальну швидкість; t_5 – момент початку гальмування механізмів. Величина Δs – цілнчисельна, що показує знак заокруглення до цілого числа „ \approx ”. Її зміна показана на рис. 3.9

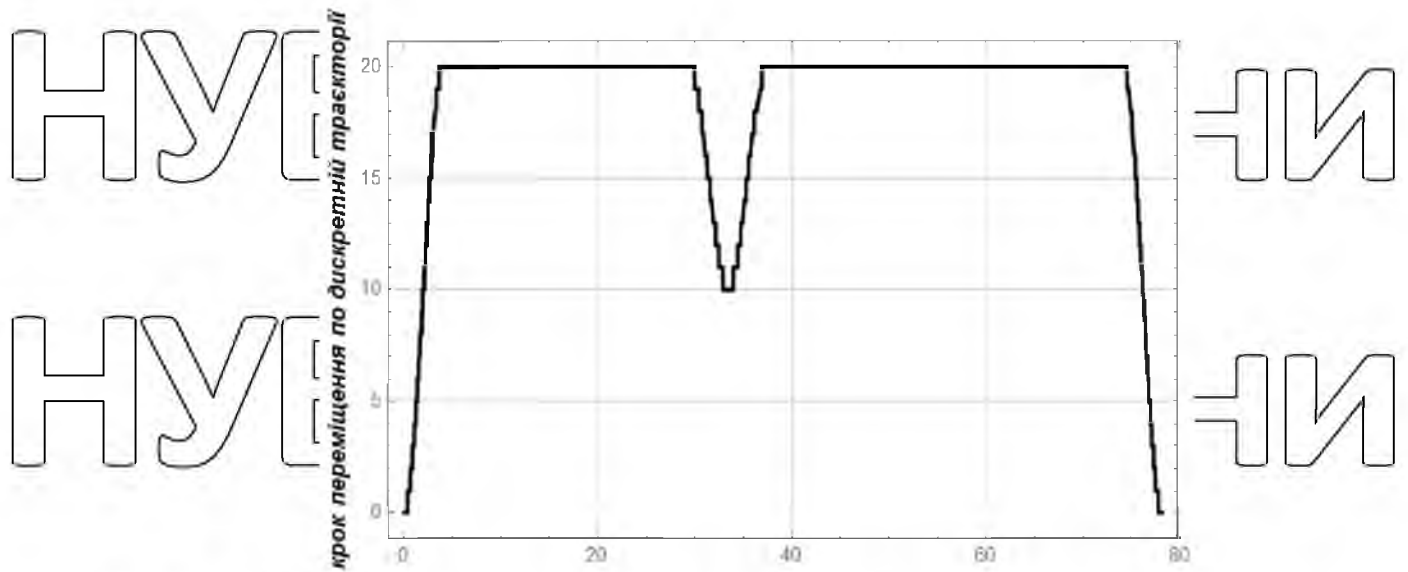


Рисунок 3.9 – Графічне зображення кроку переміщення Δs протягом періоду руху вантажу по траєкторії

Рисунок 3.9 ілюструє ключові моменти часу, визначені під час оптимізації руху вантажу балкового крана. Він демонструє, як вантаж досягає номінальної швидкості 0,2 м/с у момент часу t_1 на 4-й секунді (із зміщенням $\Delta s=20$ мм), продовжує рух на номінальній швидкості до моменту часу t_2 , коли починається зниження швидкості до проміжної швидкості (зі зміщенням від 20 до 10 мм), досягає цієї проміжної швидкості 0,1 м/с у момент t_3 , повертається до номінальної швидкості у момент t_4 , і гальмує до стану спокою у момент t_5 .

На основі цих спостережень можна зробити висновок, що при русі на номінальній швидкості 0,2 м/с вантажу потрібно проходити відстань у 20 мм за кожні 0,1 секунди, що відповідає частоті команд у 0,1 секунду. Це означає, що за одну секунду вантаж проходить відстань 2 см.

Після цього проводиться розрахунок узгоджених положень візка та стріли. Ця методика розрахунку аналогічна тій, що була застосована у пункті 2.1, тому детально на ній не зупиняємось. У результаті отримано масиви, що відображають положення візка та стріли, які були представлені на рис. 3.10.

Ці розрахунки та візуалізації дозволяють точно відстежувати рух вантажу та відповідні зміни в положеннях механізмів баштового крана, що є ключовим для досягнення цілей оптимізації сумісного руху механізмів при переміщенні вантажу по заданій траєкторії.

Після отримання дискретних значень положень візка та стріли баштового крана було виконано розрахунок їх дискретних швидкостей. Для цього, як і в попередніх випадках, було застосовано поліноміальний фільтр Савицького-Толя. Цей метод дозволяє з високою точністю визначити швидкість руху обох механізмів на основі дискретних даних положень. Результати цих розрахунків

були представлені на графіку (рис. 3.10).

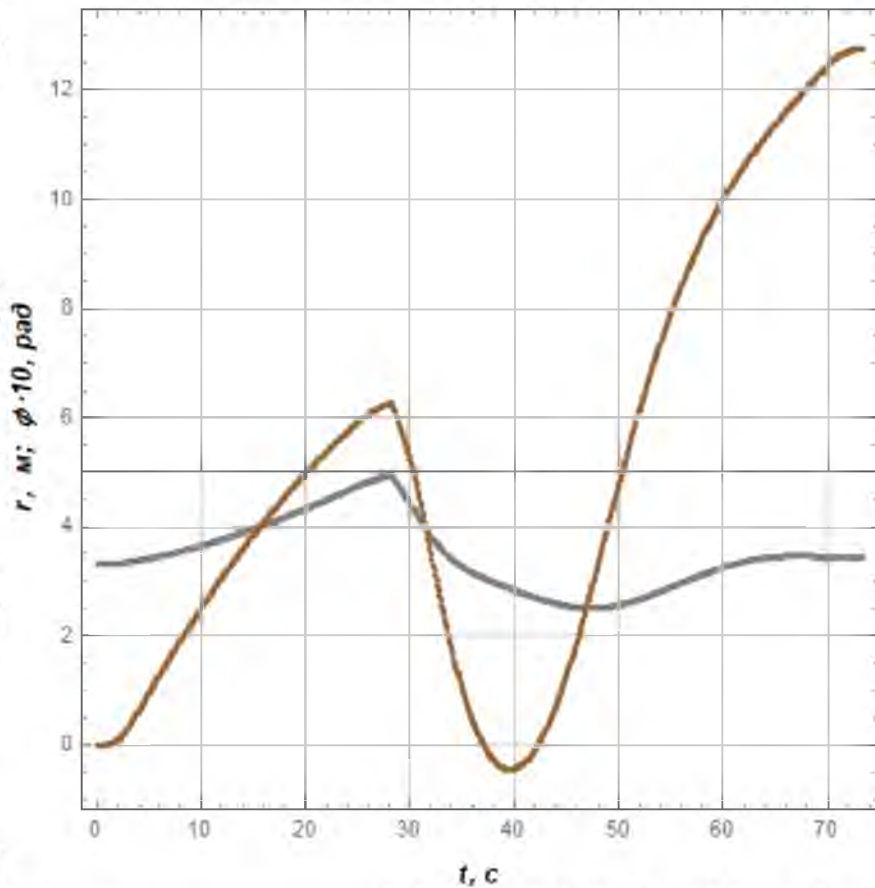
Завдяки цим розрахункам, побудова законів руху вантажу у трьох наближеннях дозволила значно покращити характеристики руху вантажу.

Фінальна траєкторія руху, яка представлена на рисунку 3.10, чітко демонструє це покращення. Вона відображає зміни, які були внесені в процес оптимізації, відображаючи більш плавний та точний рух вантажу відповідно до заданої траєкторії.

НУ

НУ

НУ



ИИ

ИИ

ИИ

НУЫШ І УКРАЇНИ

НУБІП УКРАЇНИ

НУБІП УКРАЇНИ

НУБІП УКРАЇНИ

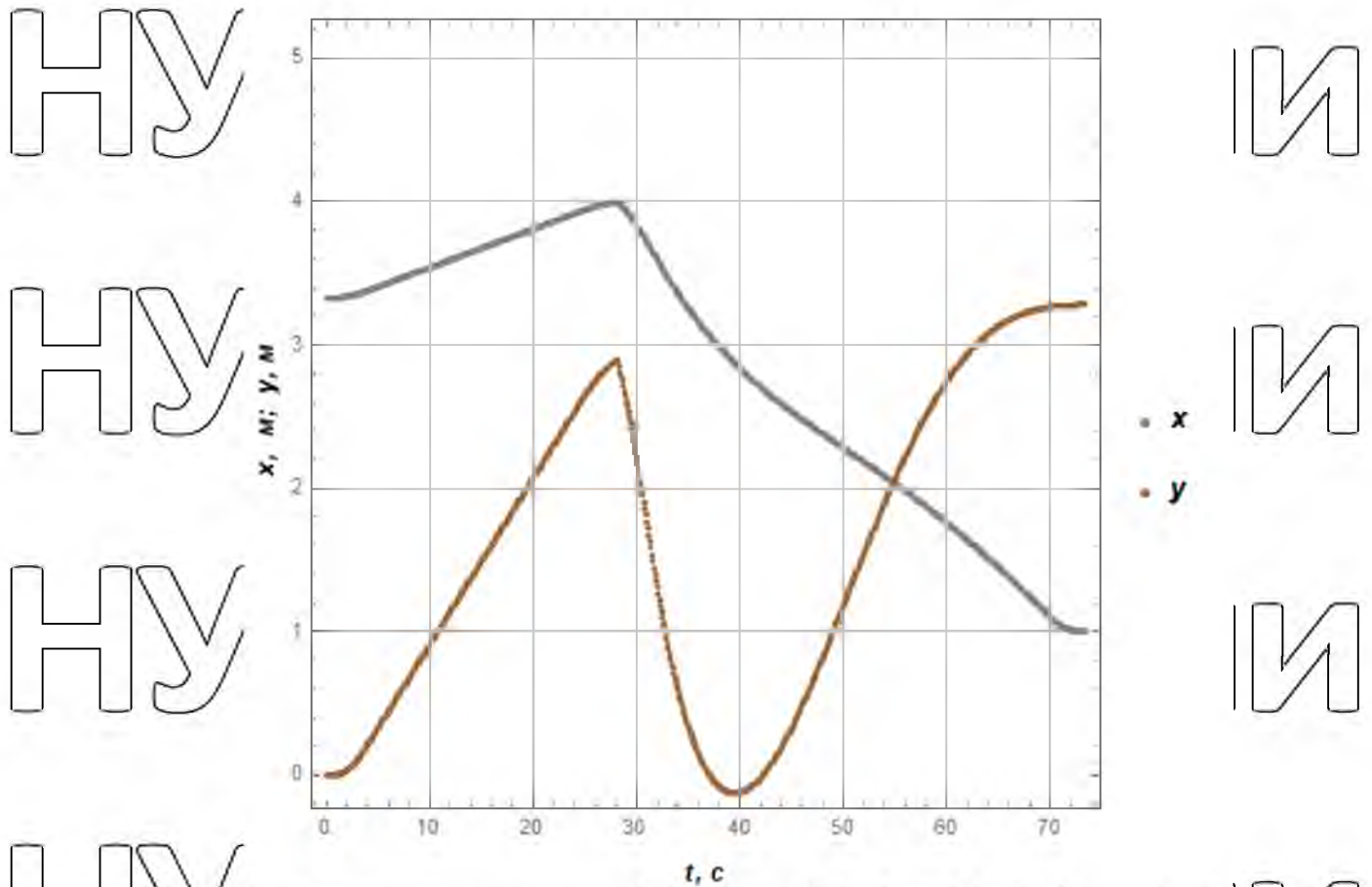


Рисунок 3.10 – Графічне зображення лінійної швидкості руху візка та кутової швидкості повороту стріли баштового крана

Оптимізація траєкторії руху, проведена в трьох наближеннях, як видно з графіка, дозволила досягти суттєвого покращення характеристик руху вантажу. Завдяки цьому вдалося досягти більш плавного та точного слідування заданій траєкторії руху. Фінальна траєкторія, що відображена на графіку, показує значну різницю порівняно з первинними даними, зокрема, зменшення ривків і забезпечення більш рівномірного руху вантажу, що є показником ефективності проведення оптимізаційних робіт.

НУБІП України

Висновки до розділу 3:

НУБІП України

1) Проведена оптимізація траєкторії руху вантажу баштовим краном у трьох наближеннях демонструє значне покращення в динаміці руху вантажу. Це включає зменшення ривків та досягнення більш рівномірного та плавного руху вантажу.

НУБІП України

2) Фінальна траєкторія руху, яка була виведена після оптимізаційних процедур, відображена на графіку, показує чітку відмінність порівняно з первинними даними. Вона відзначається своєю плавністю і точністю, що свідчить про успішність впроваджених оптимізаційних заходів.

НУБІП України

3) Покращення в динаміці руху вантажу підтверджує ефективність проведених оптимізаційних робіт. Це створює підґрунтя для підвищення ефективності використання баштових кранів, зменшення часу виконання робіт та підвищення безпеки на будівельних майданчиках.

НУБІП України

4) Здобуті результати відкривають нові перспективи для подальшого дослідження та розвитку оптимізаційних методів у контексті управління баштовими кранами, що може сприяти розробці нових підходів та технологій у цій галузі.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

РОЗДІЛ 4

ПРАКТИЧНЕ ВПРОВАДЖЕННЯ ОПТИМІЗАЦІЇ СУМІСНОГО РУХУ У РОБОТІ БАШТОВИХ КРАНІВ

4.1 Аналіз моделі баштового крану з точки зору технічних можливостей та практичної реалізації сумісності з системами оптимізації.

Баштовий кран Liebherr 71 EC, виробництва Німеччини 2007 року, є високоефективним обладнанням для будівельних робіт, особливо у ситуаціях, де потрібна висока вантажопідйомність та гнучкість у маневруванні. Цей кран має вантажопідйомність до 5 тонн, висоту під стрілою 45 метрів та висіт стріли також 45 метрів, що забезпечує велику робочу зону. На кінці стріли кран може піднімати вантажі вагою до 1 тонни, що дозволяє виконувати широкий спектр завдань на будівельному майданчику.



Рис. 4.1 – Баштовий кран Liebherr 71 EC

Основні переваги баштового крана Liebherr 71 EC можна детально описати, розглядаючи його конструктивні особливості та технологічні інновації. Вони представлені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Особливості баштового крана Liebherr 71 EC

Поворотна частина крана	<ul style="list-style-type: none">– підйомний механізм крана забезпечує гладкий та рівномірний підйом вантажів, виключаючи ривки та коливання, що особливо важливо при роботі з великоваговими вантажами;– поворотний механізм, який включає в себе високоточні приводи та системи керування, забезпечує точність позиціонування вантажу, що є критичним для ефективної роботи на складних будівельних майданчиках;– центральний розподільний щит та опорно-поворотний пристрій гарантують стабільність та безпеку конструкції крана навіть при високих навантаженнях і складних метеорологічних умовах.
Інтелектуальна система управління	<ul style="list-style-type: none">– система сприяння кранівнику забезпечує автоматизований контроль за діями крана, дозволяючи оптимізувати робочі процеси та знизувати ризики при експлуатації;– інтелектуальні алгоритми управління допомагають забезпечити високу точність роботи, уникаючи помилок, які можуть виникати внаслідок людського фактора;– система управління також включає функції автоматичного виявлення та попередження про можливі

<p>висока швидкість та продуктивність</p>	<p>несправності, що підвищує надійність обладнання та безпеку робіт.</p>
<p>Висока швидкість та продуктивність</p>	<p>– наявність 2-х кратного запасування дозволяє крану швидко реагувати на зміни умов роботи та ефективно виконувати перевалку вантажів, знижуючи загальний час, необхідний для завершення робіт;</p>
<p>Висока швидкість та продуктивність</p>	<p>– висока продуктивність крана також сприяє економії часу та ресурсів на будівельному майданчику, дозволяючи більш ефективно використовувати обладнання та персонал;</p>
<p>Висока швидкість та продуктивність</p>	<p>– кран оснащений системами, що гарантують швидку адаптацію до різних робочих сценаріїв, що робить його універсальним інструментом для різноманітних будівельних проектів.</p>

На основі проведеного аналізу баштового крана Liebherr 71 EC можна зробити висновок, що його технічні характеристики та інноваційні технології відіграють ключову роль у реалізації цілей магістерської роботи, зокрема в оптимізації сумісного руху механізмів баштового крана.

Поворотна частина крана, що включає відйомний і поворотний механізми, забезпечує високу маневреність та точність позиціонування вантажу, що є важливим для безпечного та ефективного виконання будівельних робіт.

Інтелектуальна система управління сприяє оптимізації робочих процесів та підвищенню безпеки, знижуючи ризики, пов'язані з людським фактором. Висока швидкість та продуктивність, досягнута завдяки двократному запасуванню, дозволяє ефективно виконувати завдання, знижуючи час на перевалку вантажів.

НУБІП України

Таким чином, використання баштового крана Liebherr 71 EC дозволяє не лише підвищити продуктивність будівельних робіт, але й гарантує високий рівень безпеки та надійності. Ці аспекти відповідають основним цілям магістерської роботи, спрямованих на вдосконалення управління та використання баштових кранів на будівельних майданчиках. Враховуючи ці переваги, можна стверджувати, що вибір Liebherr 71 EC є оптимальним для вирішення задач, поставлених у магістерській роботі.

4.2 Рекомендації щодо обладнання баштового крану для практичної реалізації

Ефективне використання баштових кранів вимагає високоточного управління електромоторами, що можливо завдяки застосуванню передових частотних перетворювачів Siemens. Ці перетворювачі, розроблені спеціально для регулювання швидкості обертання різних видів електромоторів, підходять для широкого спектру механізмів, включаючи баштові крани.

Для практичної реалізації запропонованої стратегії оптимізації сумісного руху механізмів баштового крана, особливу увагу слід звернути на використання частотного перетворювача Siemens SINAMICS G120C потужністю 1,1 кВт, призначеного для трьохфазних мереж 380 В. Цей перетворювач є ідеальним рішенням для керування швидкістю обертання електродвигунів, що використовуються в баштових кранах, завдяки його високій ефективності, точності та надійності. SINAMICS G120C забезпечує плавне регулювання швидкості, що дозволяє досягти оптимального контролю над переміщенням вантажу, а також ефективно знижує енергоспоживання та витрати на обслуговування. Крім того, завдяки своїм компактним розмірам та гнучкості в налаштуваннях, цей перетворювач легко інтегрується в існуючі системи управління, що робить його ідеальним вибором для сучасних баштових кранів.



Рис. 4.1 – Частотно перетворювача Siemens SINAMICS GT20C

Ключові переваги частотних перетворювачів siemens для баштових кранів

- Потужності від 0,1 до 630 кВт, що дозволяє точно налаштувати роботу крана відповідно до вимог.
- Забезпечення високого рівня захисту для електродвигунів, включаючи тепловий та електричний захист.
- Компативільність з синхронними та асинхронними двигунами від різних виробників.

Стабільна та малощумна робота двигуна навіть при значних навантаженнях.

– Функція обмеження струму для запобігання перевантажень

Рекомендації щодо використання в баштових кранах:

– Застосування частотних перетворювачів Siemens для точного контролю швидкості електродвигунів баштових кранів.

– Вибір перетворювачів з векторним управлінням для забезпечення точності та гнучкості у рухах крана.

– Ефективна оптимізація споживання електроенергії та зниження витрат на експлуатацію.

– Гарантування високих показників безпеки та надійності в роботі.

Використання GPS-моніторингу для підвищення ефективності та контролю роботи баштових кранів

У рамках оптимізації роботи баштових кранів особливе місце займає впровадження систем GPS моніторингу. Цей підхід дозволить не тільки точно відстежувати рух крана, але й контролювати використання палива, час зупинок та інші важливі показники. Інтеграція GPS моніторингу в систему управління баштовими кранами дозволяє уникнути несанкціонованого використання техніки, неефективного її використання та інших потенційних зловживань.

Використання GPS технологій сприяє максимально ефективному використанню автопарку, зниженню собівартості робіт та підвищенню загальної продуктивності роботи баштових кранів. Важливо, що система GPS моніторингу допомагає створити презервований та контрольований робочий процес, забезпечуючи високу ефективність та безпеку при виконанні будівельних завдань.

Для практичної реалізації оптимізації роботи баштових кранів в рамках магістерської роботи, акцентуємо увагу на використанні GPS-моніторингу, який стає ключовим інструментом у підвищенні ефективності та безпеки експлуатації

специфіки. Впровадження GPS-технологій дозволяє точно відслідковувати місцезнаходження крана, аналізувати його робочі цикли та оптимізувати використання ресурсів. Це важливо не тільки для забезпечення дисципліни персоналу та попередження несанкціонованого використання обладнання, але й для зниження загальних витрат на експлуатацію.

Встановлення GPS-трекерів на баштові крани надає можливість проводити точне планування робіт, забезпечуючи ефективне виконання завдань та мінімізуючи час простою. Крім того, за допомогою систем GPS можна вести моніторинг витрати палива, що дозволяє значно скоротити витрати та підвищити екологічну безпеку. Ці системи також сприяють підвищенню рівня безпеки на робочому місці, надаючи можливість виявляти та оперативно реагувати на потенційні небезпеки чи технічні несправності.

Інтеграція GPS-моніторингу з системами управління та бухгалтерським обліком відкриває нові перспективи для оптимізації роботи та ведення документації, забезпечуючи високий рівень контролю за всіма аспектами роботи кранів. Необхідно також забезпечити належне навчання персоналу для роботи з цими системами, щоб повною мірою використати їх потенціал. Отже, впровадження GPS-моніторингу в системи управління баштовими кранами стає важливим кроком на шляху до підвищення продуктивності, безпеки та економічної ефективності в будівельній індустрії.

Для досягнення ефективно оптимізації сумісного руху механізмів баштового крана, ключовим аспектом є точне відстеження і контроль рухів та орієнтації крана. Використання високоточних датчиків є вирішальним у забезпеченні точного управління та надійної роботи баштових кранів. Саме тому в даній магістерській роботі пропонується використання датчика Bosch Sensortec BMI160[27], який представляє собою інноваційний шестивісний інерційний датчик, що поєднує в собі трьохосьовий акселерометр та трьохосьовий гіроскоп.

Цей датчик був обраний через його високу точність, енергоефективність та гнучкість використання, що робить його ідеально підходящим для використання в баштових кранах. Дані, які забезпечує BM160, є критично важливими для відстеження динаміки руху крана та його вантажу, що дозволяє забезпечити не тільки точність у роботі, але й підвищену безпеку на робочому майданчику.

Отже, у контексті цієї магістерської роботи, використання датчика Bosch Sensortec BM160 стає ключовим у реалізації високоефективного та надійного механізму управління для баштових кранів.

Датчик Bosch Sensortec BM160 представляє собою високотехнологічний шестивісний інерційний датчик, який ефективно комбінує трьохосьовий акселерометр та трьохосьовий гіроскоп у одному компактному корпусі. Ця конструкція робить його ідеальним для використання в широкому спектрі застосувань, від мобільних пристроїв до складних промислових систем. Завдяки своїй енергоефективності, датчик споживає лише 950 мкА при повній швидкості роботи обох сенсорів, що є значно менше, порівняно з аналогічними пристроями на ринку.

BM160 розроблений з акцентом на гнучкість використання та простоту інтеграції. Він включає інтелектуальний алгоритм лічильника кроків, який зчитує кількість кроків безпосередньо через реєстри, що робить його вдалим рішенням для застосувань, пов'язаних з фітнесом та здоров'ям. Додатково, вбудований стабілізатор напруги з малим падінням напруги розширює діапазон вхідної напруги, полегшуючи використання датчика з різними контролерами, включаючи Arduino.

Н

Н

Н

Н



1

1

1

1

Нубіп України

Рис. 4.2 – Модуль датчика Bosch Sensortec BMI160

Технічні характеристики BMI160 включають широкий діапазон

вимірювань прискорення та швидкості обертання, забезпечуючи високу точність

даних. Це робить датчик особливо ефективним у ситуаціях, де необхідно точне

вистеження рухів, наприклад, у смартфонах, планшетах, а також у промислових

і автомобільних застосуваннях. Він має ступінь захисту IP20, що забезпечує

певний рівень стійкості до пилу та бруду, а широкий діапазон робочих

температур від -40 до +85 градусів за Цельсієм дозволяє використовувати його в

різних кліматичних умовах.

Нубіп України

BMI160 також підтримує стандартний I2C інтерфейс для зв'язку, що забезпечує його сумісність з більшістю сучасних мікроконтролерів і розвиткових плат. Його низьке енергоспоживання у режимі очікування та вбудовані функції аналізу даних роблять датчик зручним для інтеграції в портативні пристрої та системи, де критично важливо зберігати енергію. Загалом, Bosch Sensortec BMI160 є універсальним інструментом для точного відстеження руху, який може задовольнити потреби як у простих, так і в складних системах управління, забезпечуючи точність, гнучкість та ефективність. Нижче наведена таблиця 4.1 демонструє вище перераховані характеристики датчика Bosch Sensortec BMI160.

Таблиця 4.1
 Характеристики датчика Bosch Sensortec BMI160

Характеристика	Значення
Робоча напруга	від 3.2 В до 6 В
Споживання струму	≤ 1 мА
Інтерфейс підключення	I2C
Прискорення	± 2 g/ ± 4 g/ ± 8 g/ ± 16 g
Гіроскоп	± 125 °C, ± 250 °C, ± 500 °C, ± 1000 °C, ± 2000 °C
Акселерометр нульовий дрейф	± 40 mg
Гіроскоп нульовий дрейф	± 10 °C
Програмована частота вимірювань	від 25/32 Гц до 1600 Гц
Призначення	6D Виявлення та позиціонування
Розрядність датчиків	16
Ударостійкість	10000 g x 200 μ s
Незалежні програмовані генератори переривання	2

Вбудований буфер FIFO

1024 байта

Робоча температура

-40 ~ +85 °C

Таким чином можна стверджувати, що Bosch Sensortec BMI160 є універсальним та ефективним рішенням для широкого спектру застосувань, починаючи від вбудованих систем управління та закінчуючи переносними пристроями, надаючи точність, гнучкість та ефективність у вимірюваннях.

4.3 Розрахунок економічної ефективності баштового крана Liebherr 71

Сучасний розвиток будівельної галузі ставить перед інженерами-механіками завдання оптимізації використання баштових кранів. Одним із ключових аспектів ефективного використання кранового обладнання є оптимізація сумісного руху механізмів крана для забезпечення точної та ефективного транспортування вантажів. Точність руху вантажу по заданій траєкторії грає важливу роль у забезпеченні безпеки, зниженні часу на переміщення вантажів та збільшенні продуктивності робіт.

У цій роботі акцентується увага на баштовому крані Liebherr 71 EC[28], який широко використовується в будівельній індустрії. Дослідження орієнтоване на аналіз та оптимізацію роботи його ключових механізмів, зокрема, системи управління, поворотного механізму та механізму переміщення вантажу.



Рисунок 4.1 – Баштовий кран Liebherr 71 EC

Таблиця 4.1

Огляд основних характеристик баштового крана Liebherr 71 EC

№	Категорія	Характеристика	Значення
1	Технічні характеристики	Максимальна висота підйому	28 м
2	Технічні характеристики	Максимальна вантажопідйомність	5 т
3	Технічні характеристики	Виліт стріли	від 3,4 до 45 м

4	Технічні характеристики	Максимальний вага вантажу на кінці стріли	1,5 т
5	Конструктивні особливості	Відсутність оголовка для спрощення монтажу	Так
6	Конструктивні особливості	Система автоматичного погашення коливань	Так
7	Конструктивні особливості	Інтегрований контроль вітрової навантаження	Так
8	Управління	Пульт дистанційного управління	Так
9	Управління	Безступінчатє регулювання швидкості	Так
10	Управління	Система управління Litronic для обмеження робочої зони	Так
11	Експлуатаційні характеристики	Плавність руху стріли	Так
12	Експлуатаційні характеристики	Однорисковий пружинний гальмо	Так
13	Експлуатаційні характеристики	Висока швидкість перевалки вантажів	Так

Ці особливості крана Liebherr 71 EC роблять його ідеальним кандидатом для оптимізації руху вантажу. У цьому дослідженні буде проаналізовано, як ці характеристики впливають на продуктивність робіт та безпеку на будівництві, а також розглянуто можливі шляхи їх покращення.

У таблиці 4.2 представлені вихідні дані для розрахунку економічної ефективності використання баштового крана Liebherr 71 EC. Ці дані важливі для аналізу загальної продуктивності та вартісної ефективності крана в реальних

умовах експлуатації. Вони включають інформацію про вартість оренди, робочий час, середню вантажопідйомність, а також коефіцієнти використання за різними параметрами. Крім того, в таблиці наведені дані про тривалість циклу роботи крана у звичайному та оптимізованому режимах. Ці параметри дозволяють оцінити потенційні можливості для збільшення ефективності крана, а також визначити ключові аспекти, які впливають на загальну продуктивність.

Таблиця 4.2.
Вихідні дані для розрахунку економічної ефективності

Вхідні дані	Значення
Вартість оренди [26]	350 грн/год
T (робочий час машини за рік) 16 год/день · 230 днів у році = 3680	3680 год
Q (середня вантажопідйомність)	2,775 т $Q = (5 + 1,55) / 2 = 2,775$ т
Kд (коэф. використання за добу)	0,6
Kр (коэф. використання за рік)	0,7
Kв (коэф. використання за вантажопідйомністю)	0,55
T _{звичайне} (тривалість циклу звичайне)	2,7 хв
T _{оптим} (оптимізоване)	2,4 хв

Аналізуючи таблицю 4.2, можна зробити висновки щодо різних аспектів економічної ефективності використання баштового крана Liebherr 71 EC. Вартість оренди крана вказана як 390 грн/год, що є важливим чинником при оцінці витрат на будівельний проект. Загальний робочий час машини за рік визначено як 3680 годин, виходячи з 16-годинної робочої зміни та 230 робочих днів у році, що демонструє великий потенціал для використання крана в

різноманітних проєктах. Середня вантажопідйомність крана, розрахована як 2,775 тонн, вказує на його здатність ефективно працювати з різними вантажами.

Коефіцієнти використання за добу, роком та вантажопідйомністю показують, наскільки ефективно використовується кран у різних умовах.

Особливо важливо звернути увагу на тривалість циклу роботи крана при звичайному та оптимізованому управлінні, де видно потенціал для зменшення часу на виконання робіт та підвищення загальної продуктивності. Ці дані допомагають краще зрозуміти, як можна підвищити ефективність роботи крана

Liebherr 71 EC, що є ключовим для оптимізації робочих процесів та зниження витрат у будівельній галузі.

Економічний ефект від оптимізації руху механізмів баштового крана полягає у зниженні експлуатаційних витрат за рахунок скорочення тривалості циклу переміщення вантажу. Завдяки оптимізації руху механізмів, кранівник має

менше потреб у коригуванні переміщення вантажу з точки в точку, що дозволяє значно заощадити час. Ця економія часу сприяє підвищенню продуктивності роботи баштового крана Liebherr, що, в свою чергу, призводить до зменшення необхідності у тривалій оренді крана та підвищує його економічну ефективність.

Річну продуктивність баштового крана можна обрахувати використовуючи спеціальну формулу. Це дозволить визначити різницю в продуктивностях кранів зі звичайним рухом та оптимізованим рухом механізмів.

$$Q = 60 * 3680 * 2,775 * 0,6 * 0,7 * 0,55 * (2,7^{-1} - 2,4^{-1}) = 6553 \text{ т/рік}$$

Отже, різниця між продуктивністю роботи баштових кранів зі звичайними та оптимізованими системами керування може бути виразною. Годинна продуктивність крана зі звичайною системою керування може бути обрахована.

$$P_{\text{год}} = 60 / 2,7 * 0,6 * 0,7 * 0,55 = 5,13 \text{ т/год}$$

Розділивши отримані значення, можна визначити економію часу. Вартість оренди баштового крана з урахуванням його продуктивності з оптимізованою системою керування дає нам можливість обрахувати економічну ефективність.

$$6553/5,13=1277,39 \text{ год}$$

Орендна вартість баштового крана Liebherr 71 EC становить 350 грн/год.

Таким чином, економічна ефективність, досягнута в результаті збільшення продуктивності роботи баштового крана Liebherr 71 EC з оптимізованим, складає:

$$1277,39*350=447086 \text{ грн/рік}$$

Припускаючи, що загальний термін експлуатації крана становить певний період, наприклад 25 років, можна визначити відповідний економічний ефект від впровадження системи оптимізації.

$$447086*25=11177150 \text{ грн}$$

Аналізуючи вище проведені розрахунки, можна сказати, що оптимізація роботи баштового крана приносить значні переваги. Впровадження оптимізованої системи керування значно підвищує річну продуктивність крана, що дозволяє виконувати ті ж обсяги робіт за значно менший час. Це особливо важливо в умовах, де час є критичним фактором і може впливати на загальну вартість проекту.

Коли ми розглядаємо економічну ефективність, зниження часу, необхідного для виконання робіт, безпосередньо призводить до зменшення витрат на оренду обладнання. Це може бути особливо значущим у великих будівельних проектах, де економія на оренді обладнання може сягати сотень тисяч гривень на рік.

Довгострокова перспектива також є важливою. Припускаючи, що кран буде використовуватися протягом 25 років, загальна економія може сягати мільйонів гривень. Це не тільки знижує витрати, але й може покращити загальну рентабельність будівельних проектів.

Таким чином, впровадження оптимізованої системи керування в роботу баштових кранів може бути вкрай вигідним з погляду як часової ефективності, так і з економічної точки зору.

Висновки до розділу 4:

Висока маневреність та точність позиціонування вантажу, які забезпечуються завдяки унікальній конструкції цього крана, відіграють важливу роль у забезпеченні безпечного та ефективного виконання будівельних робіт.

Інтелектуальна система управління, що входить до складу крана, сприяє оптимізації робочих процесів, підвищуючи безпеку та зменшуючи можливість помилок, які можуть виникнути внаслідок людського фактору.

Використання частотних перетворювачів Siemens SINAMICS G120C та систем GPS-моніторингу у баштових кранах підвищує точність керування, забезпечуючи плавність руху та ефективність використання ресурсів. Таке технологічне обладнання дозволяє точно відстежувати переміщення крана, контролювати споживання палива та інші важливі параметри, що веде до більш ефективного та безпечного використання крана.

Оптимізація роботи крана сприяє значній економії часу та витрат, особливо у великих будівельних проектах, де кожна хвилина та кожен ресурс мають важливе значення. Ефективне управління та використання крана не тільки зменшує загальні витрати, але й підвищує продуктивність роботи на будівельному майданчику.

ВИСНОВОК

НУБІП України

1) Вивчення теоретичних основ та практичних аспектів роботи баштових кранів, включаючи їхню роль у будівництві, механізми руху вантажу та принципи планування, виявило їх складність та важливість. Особлива увага була зосереджена на оптимізації руху вантажів, що відкриває можливості для подальшого розвитку технологій у цій сфері.

НУБІП України

2) Стійке зростання інтересу до оптимізації руху баштових кранів від 2019 до 2023 року вказує на активність досліджень і розвиток технологій. Виявлені тенденції надають орієнтир для стратегій розвитку і інновацій у цій галузі.

НУБІП України

3) Розробка та імплементація оптимізованих законів руху в механізмах баштових кранів, які забезпечують точність і ефективність переміщення вантажу, підкреслюють необхідність продовження вдосконалення цих систем.

НУБІП України

4) Використання сучасних технологій, таких як частотні перетворювачі та системи GPS-моніторингу, сприяє оптимізації робочих процесів, підвищенню безпеки та ефективності, що в кінцевому підсумку веде до значної економії часу та ресурсів, особливо в масштабних будівельних проєктах.

НУБІП України

5) Проведення дослідження підкреслює важливість постійного розвитку та інновацій в оптимізації руху баштових кранів, що є ключовим для підвищення ефективності, безпеки та зниження витрат у будівельній індустрії.

НУБІП України

НУБІП України

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Wikipedia. Баштовий кран [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Баштовий_кран
2. Wu, K., García de Soto, B., & Zhang, F. (2020). Spatio-temporal planning for tower cranes in construction projects with simulated annealing. *Automation in Construction*, 111, 103060. doi:10.1016/j.autcon.2019.103060
3. Dutta, S., et al. (2020). Automatic re-planning of lifting paths for robotized tower cranes in dynamic BIM environments. *Automation in Construction*, 110, 102998. doi:10.1016/j.autcon.2019.102998.
4. Zhang, M., Zhang, Y., Ji, B., Ma, C., & Cheng, X. (2020). Adaptive sway reduction for tower crane systems with varying cable lengths. *Automation in Construction*, 119, 103342. doi:10.1016/j.autcon.2020.103342
5. Kaveh, A., & Vazirinia, Y. (2018). Optimization of Tower Crane Location and Material Quantity Between Supply and Demand Points: A Comparative Study. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. doi:10.3311/PPci.11816
6. Hu, S., Fang, Y., & Bai, Y. (2021). Automation and optimization in crane lift planning: A critical review. *Advanced Engineering Informatics*, 49, 101346. doi:10.1016/j.aei.2021.101346
7. Chwastek, S. (2020). Optimization of crane mechanisms to reduce vibration. *Automation in Construction*, 119, 103335. doi:10.1016/j.autcon.2020.103335
8. Ju, F., & Choo, Y. S. (2005). Dynamic Analysis of Tower Cranes. *Journal of Engineering Mechanics*, 131(1), 88-96. doi:10.1061/(ASCE)0733-9399(2005)131:1(88)
9. Zhang, P., Harris, F. C., Olomolaiye, P. O., & Holt, G. D. (1999). Location Optimization for a Group of Tower Cranes. *Journal of Construction Engineering*

and Management, 125(2), 115-122. doi:10.1061/(ASCE)0733-9364(1999)125:2(115).

10. Al-Hussein, M., Niaz, M. A., Yu, H., & Kim, H. (2006). Integrating 3D visualization and simulation for tower crane operations on construction sites. Automation in Construction, 15(5), 554-562. doi:10.1016/j.autcon.2005.07.007.

11. Tam, C. M., Leung, A. W. T., & Liu, D. K. (2002). Nonlinear Models for Predicting Hoisting Times of Tower Cranes. Journal of Computing in Civil Engineering, 16(1), 76-81. doi:10.1061/(ASCE)0887-3801(2002)16:1(76).

12. Younes, A., & Marzouk, M. (2018). Tower cranes layout planning using agent-based simulation considering activity conflicts. Automation in Construction, 93, 348-360. doi:10.1016/j.autcon.2018.05.030.

13. Zhang, Z., & Pan, W. (2021). Virtual reality supported interactive tower crane layout planning for high-rise modular integrated construction. Automation in Construction, 130, 103854. doi:10.1016/j.autcon.2021.103854

14. Li, X., Chi, H., Wu, P., & Shen, G. Q. (2020). Smart work packaging-enabled constraint-free path re-planning for tower crane in prefabricated products assembly process. Advanced Engineering Informatics, 43, 101008. doi:10.1016/j.aei.2019.101008

15. Hasan, S., Bouferguene, A., Al-Hussein, M., Gillis, P., & Telyas, A. (2013). Productivity and CO2 emission analysis for tower crane utilization on high-rise building projects. Automation in Construction, 31, 255-264. doi:10.1016/j.autcon.2012.11.044

16. Huang, T., Kong, C.W., Guo, H.L., Baldwin, A., & Li, H. (2007). A virtual prototyping system for simulating construction processes. Automation in Construction, 16(5), 576-585. doi:10.1016/j.autcon.2006.09.007

17. Hasan, S., Al-Hussein, M., & Gillis, P. (2010). Advanced Simulation of Tower Crane Operation Utilizing System Dynamics Modeling and Lean Principles.

Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference. B. Johansson, S. Jain, J. Montoya-Torres, J. Hugan, & E. Yücesan (Eds.).

18. Bonnabel, S., & Claeys, X. (2020). The Industrial Control of Tower Cranes: An Operator-in-the-Loop Approach.
19. Samin, R. E., & Mohamed, Z. (2017). Comparative assessment of anti-sway control strategy for tower crane system. AIP Conference Proceedings, 1883, 020035. doi:10.1063/1.5002053.
20. Ramli, L., Mohamed, Z., Abdullahi, A. M., Jaafar, H. I., & Lazim, I. M. (2017). Control strategies for crane systems: A comprehensive review. Mechanical Systems and Signal Processing, 95, 1-23. doi:10.1016/j.ymssp.2017.03.015.
21. Duong, S. C., Uezato, E., Kinjo, H., & Yamamoto, T. (2012). A hybrid evolutionary algorithm for recurrent neural network control of a three-dimensional tower crane. Automation in Construction, 23, 55-63. doi:10.1016/j.autcon.2011.12.005.
22. Takagi, K., & Nishimura, H. (2003). Control of a Jib-Type Crane Mounted on a Flexible Structure. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 11(1), 32-42. doi:10.1109/TCST.2002.806435.
23. Rauscher, F., & Sawodny, O. (2020). Modeling and Control of Tower Cranes with Elastic Structure. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 28(1), 271-283. doi:10.1109/TCST.2019.2961639.
24. Shapira, A., & Elbaz, A. (2014). Tower Crane Cycle Times: Case Study of Remote-Control versus Cab-Control Operation. Journal of Construction Engineering and Management, 140(7), 05014010. doi:10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000904.
25. Roman, R.-C., Precup, R.-E., Petriu, E. M., & Dragan, B. (2019). Combination of Data-Driven Active Disturbance Rejection and Takagi-Sugeno Fuzzy Control

with Experimental Validation on Tower Crane Systems. Energies, 12(8), 1548.
doi:10.3390/en12081548.

25. Machineryline. Оренда баштових кранів LIEBHERR 71 EC [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://machineryline.ua/ru/-/arenda/bashemnye-kraniv/Liebherr/71EC--rf19040115544005064400>

27. Arduino Україна. Модуль датчика 6D BMI160: акселерометр та гіроскоп [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://arduino.ua/ru/prod3802-modul-datchika-6d-bmi160-akselerometr-ta-giroskop>

28. Lectura Specs. Баштовий кран Liebherr 71 EC: технічні характеристики [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.lectura-specs.com.ua/ua/model/krani/bastovi-krani-stanga-strumoprjmaca-verhnerovorotni-liebherr/71-ec-b-1049591>

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України