

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

**МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА**

01.09. – КМР.204 «С». 2022.02.04. 015. ПЗ

НУБІП України

**ВЕЛИКОІВАНЕНКО ДМІТРО ПІДРОБИЧ**

НУБІП України

**2023**

НУБІП України

НУБІП України

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ

І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет конструювання та дизайну

УДК 621.8.032.2

ПОГОДЖЕНО:

Декан факультету

конструювання та дизайну

Ружи́ло З.В.

(підпис)

«  » травня 2023 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ:

Завідувач кафедри конструювання

машин і обладнання

Ловейкін В.С.

(підпис)

«  » травня 2023 р.

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

на тему: «ПЛАНУВАННЯ ТРАЄКТОРІЇ РУХУ ВАНТАЖУ, ЩО ПЕРЕМІЩУЄТЬСЯ БАШТОВИМ КРАНІМ»

01.09. – КМР.204 «С». 2022.02.04.015. ІЗ

Спеціальність – 133 «Галузеве машинобудування»

Освітня програма – «Машини та обладнання сільськогосподарського виробництва»

Орієнтація освітньої програми – освітньо-наукова

Керівники магістерської роботи:

д.т.н. проф.

Виконав:

Ромасевич Ю.О.

(підпис)

Великоіваненко Д.І.

(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)

«    » травня 2023 р.

**ЗАВДАННЯ**

**ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ**

**ВЕЛИКОІВАНЕНКУ ДМИТРУ ІГОРОВИЧУ**

Спеціальність – 133 «Галузеве машинобудування»

Освітня програма – «Машини та обладнання сільськогосподарського  
виробництва»

Орієнтація освітньої програми – освітньо-наукова

Тема магістерської роботи: «планування траєкторії руху вантажу, що  
переміщується баштовим краном», затверджена наказом ректора від «14»  
листопада 2022 р. № 204 «С».

Термін подання завершеної роботи на кафедру 12.05.2023 р.

Вихідні дані до магістерської роботи: Дослідження в області планування  
траєкторії руху вантажу, що переміщується баштовим краном, розробка та аналіз  
законів руху механізмів зміни вильоту вантажу і повороту крану, опис  
програмного забезпечення для керування механізмом баштового крану, технічні  
характеристики баштового крану та методики проведення експериментальних  
досліджень.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Виконати аналіз науково-технічних робіт у даній галузі в частині методів та підходів, які використані для планування траєкторії руху вантажу, що переміщується баштовим краном.
2. Виконати розробку законів руху механізмів зміни вильоту вантажу і повороту крану в різних наближеннях.
3. Провести опис та аналіз програмного забезпечення для керування механізмом баштового крану, в тому числі частотних перетворювачів.
4. Виконати підготовку та калібрування датчиків перед проведенням експерименту.
5. Провести експериментальні дослідження з використанням установки баштового крану.
6. Розробити структурну схему автоматизованої системи керування краном і визначити економічну ефективність використання такої системи.

Перелік графічних документів:

Дата видачі завдання: 14.11.2022 р.

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

Ромасевич Ю.О.

(підпис)

Завдання прийняв до виконання:

\_\_\_\_\_ Великоіваненко Д.І.

(підпис)

<b>ЗМІСТ</b>	
ВСТУП .....	6
РЕФЕРАТ .....	8
<b>РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ НАУКОВИХ ПУБЛІКАЦІЙ В ГАЛУЗІ ПЛАНУВАННЯ ТРАЄКТОРІЇ РУХУ ВАНТАЖУ, ЩО ПЕРЕМІЩУЄТЬСЯ БАШТОВИМ КРАНОМ .....</b>	
1.1. Кількісний аналіз наукових праць в галузі планування траєкторій руху вантажу, що переміщується баштовим краном.....	9
1.2. Кількісний аналіз патентних документів за темою дослідження.....	11
1.3. Якісний аналіз наукових праць в галузі планування траєкторій руху вантажу, що переміщується баштовим краном.....	14
Висновки до розділу 1: .....	26
<b>РОЗДІЛ 2 ПОБУДОВА ЗАКОНІВ РУХУ МЕХАНІЗМІВ ЗМІНИ ВІЛЬОТУ ВАНТАЖУ І ПОВОРОТУ КРАНУ .....</b>	
2.1. Побудова законів руху механізмів зміни вильоту вантажу і повороту крану у першому наближенні .....	28
2.2. Побудова законів руху механізмів зміни вильоту вантажу і повороту крану у другому наближенні .....	34
2.3. Побудова законів руху механізмів зміни вильоту вантажу і повороту крану у третьому наближенні .....	40
Висновки до розділу 2: .....	46
<b>РОЗДІЛ 3 БАШТОВИЙ КРАН: ОПИС, ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ .....</b>	
3.1. Опис баштового крану та його технічні характеристики.....	48

3.2 Опис програмного забезпечення для керування механізмом баштового крану	51
3.3. Частотні перетворювачі: принцип роботи та особливості застосування	58

3.4 Підготовка та калібрування датчиків перед проведенням експерименту.. 61

Висновки до розділу 3	68
РОЗДІЛ 4 ПЛАНУВАННЯ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ УСТАНОВКИ БАШТОВОГО КРАНУ	70

4.1. Процес встановлення та послідовність дій для проведення експерименту	70
Висновок до розділу 4:	73

РОЗДІЛ 5 СТРУКТУРА СИСТЕМИ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ РУХОМ МЕХАНІЗМУ ПОВОРОТУ І ЗМІНИ ВИЛЬОТУ ВАНТАЖУ БАШТОВОГО КРАНА І ТА РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ	74
---	----

5.1 Структурна схема автоматизованої системи керування краном	74
5.2 Рекомендації щодо реалізації обходу перешкоди баштовим краном	75

5.3 Розрахунок економічної ефективності баштового крана Diehert 120	79
Висновки до розділу 5:	82
ВИСНОВКИ	83

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... 85

ДОДАТКИ	91
---------	----

--	--

## ВСТУП

# НУБІП України

Сучасне промислове виробництво та будівництво потребують високої продуктивності, ефективності та безпеки. Одним із ключових елементів, що впливають на ці показники – це баштовий кран, який використовується для переміщення великих вантажів на значні відстані. Завдання планування траєкторії руху вантажу, що переміщується баштовим краном, є складним та відповідальним, оскільки воно впливає на продуктивність роботи та безпеку на робочому місці.

# НУБІП України

Саме ця проблема стала предметом даної магістерської роботи. Метою роботи є розробка законів руху механізмів зміни вильоту вантажу і повороту крану для побудови оптимальної траєкторії руху вантажу, що переміщується баштовим краном, та визначення економічної ефективності їх застосування.

# НУБІП України

Робота складається з п'яти розділів. У першому розділі проведено аналіз наукових публікацій в галузі планування траєкторії руху вантажу, що переміщується баштовим краном. Другий розділ присвячений побудові законів руху механізмів зміни вильоту вантажу і повороту крану. Третій розділ описує технічні характеристики баштового крану та його систему керування. Четвертий розділ містить планування та методику проведення експериментальних досліджень з використанням установки баштового крану. П'ятий розділ присвячений розробці структури системи оптимального керування рухом механізму повороту і зміни вильоту вантажу баштового крану та розрахунку економічної ефективності її впровадження.

# НУБІП України

# НУБІП України

У ході виконання роботи використовувалися такі методи, як аналіз наукової літератури, математичне моделювання, експериментальні дослідження та економічний аналіз.

# НУБІП України

# НУБІП України

Результати дослідження мають важливе практичне значення, оскільки вони дозволяють покращити ефективність та безпеку роботи баштового крана, що є актуальним завданням для промисловості та будівництва.

Результати цієї роботи будуть корисними не тільки для науковців, які займаються дослідженнями в області технологій кранового обладнання, але й для інженерів, які займаються експлуатацією баштових кранів на виробництві та будівництві.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України



## РЕФЕРАТ

# НУБІП України

**Актуальність.** Сучасний розвиток промисловості та будівництва потребує постійного вдосконалення технологічного обладнання, зокрема баштових кранів.

Планування траєкторії руху вантажу, що переміщується баштовим краном, є важливою задачею, яка впливає на продуктивність, безпеку роботи та якість виконуваних робіт. Отже, питання оптимізації та автоматизації цього процесу є вкрай актуальними.

**Мета і задачі дослідження.** Метою даної магістерської роботи є розробка методу оптимального планування траєкторії руху вантажу, що переміщується баштовим краном, та оцінка його економічної ефективності. Задачами дослідження є аналіз наукових публікацій з даної проблеми, розробка математичної моделі руху вантажу, проведення експериментальних досліджень та розрахунків економічної ефективності запропонованого методу.

**Об'єкт дослідження** – процес планування траєкторії руху вантажу, що переміщується баштовим краном.

**Предмет дослідження** – методи та алгоритми оптимального планування траєкторії руху вантажу, що переміщується баштовим краном.

**Методика дослідження.** У дослідженні використовувалися різноманітні методи, зокрема аналіз наукової літератури, математичне моделювання, експериментальні дослідження на установці баштового крана, розрахунок економічної ефективності. Кожний з цих методів дозволив отримати важливу інформацію для досягнення поставленої мети.

# НУБІП України

# НУБІП України

**РОЗДІЛ 1****НАУБІП УКРАЇНИ  
АНАЛІЗ НАУКОВИХ ПУБЛІКАЦІЙ В ГАЛУЗІ ПЛАНУВАННЯ  
ТРАЕКТОРІЇ РУХУ ВАНТАЖУ, ЩО ПЕРЕМІЩУЄТЬСЯ БАШТОВИМ  
КРАНОМ**

Планування траєкторій руху вантажів, що переміщуються баштовим краном, є складною технологічною задачею, яка вимагає застосування передових наукових розробок. В даному розділі буде проведено аналіз наукових публікацій

з питань планування траєкторій руху вантажу, що переміщується баштовим

краном, з метою з'ясування основних підходів до вирішення цієї проблеми. Крім

того, буде розглянуто кількісний та якісний аналіз вищевказаних наукових робіт з метою визначення їхнього наукового внеску у вирішення проблеми планування

траєкторій руху вантажу баштовим краном. Отримані результати дослідження

зможуть бути використані для покращення ефективності та точності планування

руху вантажів баштовим краном, що має важливе значення для промислового виробництва та будівельного господарства.

**1.1. Кількісний аналіз наукових праць в галузі планування траєкторій****руху вантажу, що переміщується баштовим краном**

З огляду на постійне нарощування кількості об'єктів будівництва, споруд, будівель різних розмірів та габаритів, саме за допомогою баштових кранів

здійснюються переміщення великогабаритних та важких вантажів. Але

переміщення вантажу баштовим краном не виконується за лінійною траєкторією:

інколи вантаж потрібно перемістити обминаючи деяку перешкоду. І саме тому

перед дослідниками постає питання планування траєкторії руху вантажу, що

переміщується баштовим краном. Нижче в таблиці 1 наведено кількісний аналіз

наукових праць, які опубліковані за останні роки та проіндексовані у

наукометричних базах даних Scopus [1], Web of Science [2] та Google Scholar [3], в яких дослідниками вивчається питання планування траєкторії руху вантажу, який переміщується за допомогою баштового крана.

Таблиця 1.1

Кількість пошукових запитів за період 2017-2022 рр.

Запит	Роки						Всього в базі
	2022	2021	2020	2019	2018	2017	
1	2	3	4	5	6	7	8
База Scopus							
tower crane AND trajectory planning	3	3	1	2	-	1	13
load trajectory planning	72	84	83	78	61	58	856
tower crane optimal control	5	3	3	3	1	1	39
tower crane obstacle avoidance	2	1	1	-	-	-	8
База Web of Science							
tower crane AND trajectory planning	4	4	1	2	-	1	11
load trajectory planning	75	109	97	95	70	66	875
tower crane optimal control	1	5	2	4	-	-	20
tower crane obstacle avoidance	-	1	-	1	-	-	3
База Google Scholar							
tower crane AND trajectory planning	698	1090	1090	1050	915	907	15600
load trajectory planning	15200	21700	19400	17700	16200	14700	286000
tower crane optimal control	1270	1680	1480	1380	1270	1220	21300
tower crane obstacle avoidance	363	537	538	517	452	544	12000

Було сформовано пошукові запити, які найбільш близькі до тематики планування траєкторії руху вантажу переміщуваним баштовим краном. Серед них: tower crane AND trajectory planning, load trajectory planning, tower crane

optimal control та tower crane obstacle avoidance. З таблиці 1 видно, що з плином часу питання планування траєкторії руху вантажу переміщуваним баштовим краном набирає все більшу популярність, все більше науковців намагаються знайти способи покращення роботи баштового крану, змусити його переміщувати вантаж по певній траєкторії оминаючи різні перешкоди і зменшуючи при цьому тривалість його роботи.

Таким чином, пошук оптимального рішення для обминання перешкод вантажу, що переміщується баштовим краном є актуальною науковою задачею, про що свідчить збільшення наукових публікацій за останні роки. Саме за допомогою правильно заданої траєкторії руху вантажу можна скоротити витрати часу на його переміщення і дозволить виконувати більший об'єм роботи баштового крану за менший проміжок часу, а також знизить ймовірність нещасних випадків, які можуть статися під час переміщення вантажу.

## 1.2. Кількісний аналіз патентних документів за темою дослідження

Діяльність дослідників та виробників пов'язана з винаходами, які потрібно якимось чином документувати за власником. Це потрібно для того щоб підтвердили право володіння дослідника на інтелектуальну власність і тим самим охороняти його від можливого копіювання чи незаконного використання. Для цього прийнято патентувати винахід. Патентом прийнято вважати документ, який засвідчує власність автора на його винахід та право на його використання протягом певного строку. Слід відмітити, що патентування винаходу не є обов'язковим, а лише на розсуд заявника.

Для проведення кількісного аналізу патентних документів за темою дослідження необхідно в першу чергу визначити класи патентів. Для цього було обрано з довідника патентів [4] ті класи, які найбільше відповідають темі дослідження. Серед них:

– B66C. Підйомні крани; вантажопідйомні елементи, що використовуються в кранах, кабестанах, лебідках тощо;

– B66C 13/00. Інші конструктивні елементи кранів;

– B66C 13/18. . системи управління або контрольні пристрої;

– B66C 13/06. .. для обмеження або запобігання розгойдування вантажів у поздовжньому чи поперечному напрямках;

– B66C 13/22. .. для електроприводів.

Кількісний аналіз патентних документів проводився за період з 2013 року до 2022 роки. Для пошуку відповідної інформації про патенти було використано міжнародний пошуковий центр захисту інтелектуальної власності [4]. Результати пошуку наведено у табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Кількість патентних документів за 2013-2022 рр.

Клас патенту	Роки										Всього
	2022	2021	2020	2019	2018	2017	2016	2015	2014	2013	
B66C	-	2	-	5	6	9	15	15	12	27	6756
B66C 13/00	1123	1749	952	608	626	407	370	398	372	283	11356
B66C 13/18	442	680	498	366	419	366	386	448	401	327	9681
B66C 13/06	2024	2659	1509	835	809	462	344	324	216	198	14508
B66C 13/22	614	802	767	581	596	388	383	411	298	290	16821

Так, з таблиці 1.2 ми бачимо, що клас патенту B66C з плином часу кількість патентів падає. До прикладу в 2013 році було зареєстровано 27 патентних документів, а в 2022 році на даний момент ще жодного, що приводить до думки про зниження інтересу дослідників до даного класу. Причини цього можуть бути різними. Однією з можливих можна назвати велику кількість досліджень по даній темі ще до 2013 року. Про це говорить загальна кількість патентів, яка складає 6756 одиниць.

Абсолютно зворотна ситуація спостерігається з класом патенту B66C 13/00. З плином часу кількість зареєстрованих патентних документів зростає, що говорить нам про збільшення інтересу, особливо слід відмітити 2021 рік в якому було зареєстровано 1749 одиниць, що більш ніж у 6 разів переважає кількість у 2013 році, яка складала 283 одиниці. За класами патентів B66C 13/18 та B66C 13/22 спостерігається помірне зростання, в той час, коли клас B66C 13/06 характеризується різким ростом інтересу, особливо починаючи з 2018 року коли він виріс у 2 рази у порівнянні з 2017 роком. А у 2021 році й взагалі збільшилась кількість зареєстрованих патентів більш ніж у 13 разів у порівнянні з 2013 роком, що говорить нам що дана тематика дослідження з роками набирає все більшу і більшу популярність серед дослідників.

Проведений вище кількісний аналіз патентних документів за період 2013-2022 рр. дав змогу зрозуміти тренд реєстрації інтелектуальної власності дослідників на свої винаходи. Але не менш важливим та в той час цікавим залишається запитання, де саме відбувалася реєстрація інтелектуальної власності. Для цього нижче в таблиці 1.3 наведена кількість патентних документів за їх місцем реєстрації протягом періоду 2013-2022 рр.

Таблиця 1.3

Кількість патентних документів по країнам за 2013-2022 рр.

Клас патенту	Країни									
	BE	CH	DE	ES	FI	IT	GB	JP	CN	US
B66C	398	132	78	987	489	1402	32	34	16	31
B66C 13/00	43	20	449	12	32	9	112	2434	5929	566
B66C 13/18	69	47	765	31	55	24	232	1278	2454	1248
B66C 13/06	25	11	578	38	103	29	145	2183	8019	753
B66C 13/22	11	22	505	11	46	17	107	3859	3987	479

У табл. 1.3 використано загальноживані позначення країн: BE: Бельгія (Belgium), CH: Швейцарія (Switzerland), DE: Німеччина (Germany), ES: Іспанія (Spain), FI: Фінляндія (Finland), IT: Італія (Italy), GB: Велика Британія (United Kingdom), JP: Японія (Japan), CN: Китай (China), US: Сполучені Штати Америки (United States of America).

З таблиці 1.3 ми бачимо, що лівова частина реєстрацій інтелектуальної власності припадає на Китай. І це не дивно, адже в Китаї з кожним днем зростає кількість нововведень в сфері будівництва, де здебільшого використовуються підйомні крани. Велика кількість дослідників зосереджена на тому, яким чином можна оптимізувати роботу підйомного крану, що в свою чергу призведе до скорочення часу його роботи та витрат на це коштів. І не тільки оптимізувати, а і взагалі зробити так, щоб повністю автоматизувати застосування вантажопідйомної машини. Неподалік від Китаю за результатами дослідження в таблиці 1.3 знаходиться Японія. Країнами наступними після Китаю та Японії йдуть Сполучені Штати Америки і країни Європейського союзу.

### **1.3. Якісний аналіз наукових праць в галузі планування траєкторій руху вантажу, що переміщується баштовим краном**

В сучасних умовах будівництва, баштовий кран є незамінним механізмом для підйому та переміщення вантажів. Одним з головних завдань, які стоять перед оператором баштового крану, є планування траєкторії руху вантажу, яка повинна бути плавною та оминати будь-які перешкоди на шляху. При цьому важливо враховувати економію часу та зусиль, які витрачає кран на виконання руху.

За допомогою пошукового запиту "tower crane and trajectory planning" можна знайти багато наукових статей та публікацій, які присвячені розв'язанню цього завдання. Аналіз таких джерел може допомогти оператору баштового

крану вдосконалити свої навички та дізнатись про нові розробки у галузі планування траєкторії руху вантажу. Нижче буде проведений огляд наукових джерел за запитом "tower crane and trajectory planning", що дозволить отримати більш повне розуміння проблеми та можливість застосування нових підходів до розв'язання завдання планування траєкторії руху вантажу баштовим краном.

Автори Боян Андоновські, Лі Джянцян, Шерін Джейрардж, Анг Зі Куан, Сяо Йонггао, Анг Вей Тек в своїй науковій роботі [5] описали результати досліджень роботизованого баштового крана (RTC), який є частиною цифрової системи матеріально-технічного управління виробничими запасами (DPILMS), яку можна розглядати як складну систему. Система повинна працювати вдень і вночі, в дощ і в ясну погоду. RTC має сприймати середовище за допомогою кількох датчиків. Запропоноване дослідниками рішення складається з різних датчиків, здатних локалізувати RTC у реальному часі, виявляти та відстежувати об'єкти в оточенні, а потім приймати рішення про те, як правильно реагувати протягом відповідного часу в сприйманому середовищі, а також кількох підсистем реального часу. В результаті було представлено деталі ранньої стадії розробки системи RTC. Встановили, що проблему можна вирішити шляхом використання мереж глибокого навчання (конволюційна нейронна мережа), яка забезпечує розумну точність, придатну для роботи в реальному світі.

Бу Кейї, Гарсія де Сото Борха, Чжан Фейліан у своїй науково-дослідній роботі [6] з просторо-часового планування для баштових кранів у будівництві з імітацією відпалу поставили перед собою завдання віднайти оптимальну схему планування баштового крану. В підсумку була запропонована модель просторово-часового планування для баштових кранів у будівельних проектах із імітацією відпалу, а також представлено процес розрахунку одногоденного часу підйому відповідно до конкретних вимог до підйому, враховуючи завдання підйому та можливі затримки



Дослідники Марк Буркхардт, Олівер Саводні провели дослідження алгоритму планування шляху на основі графів для керування баштовим краном [7]. Запропонували нову процедуру планування шляху для транспортних завдань баштових кранів із трьома ступенями свободи, припускаючи відому, регулярно оновлювану та квадратичну карту перешкод, отриману датчиками зображення, в якій основними цілями було визначення коротких, енергоефективних або низьких шляхів коливання навантаження та можливість поєднання з контролером проти коливання та його модулем генерації траєкторії.

В підсумку представлена нова процедура планування шляху для баштових кранів на основі полярної клітинної декомпозиції робочого простору, а також продемонстровано планувальник шляху.

Автори Оянг Хуімін, Тіань Жєнг, Ю Лілі, Чжан Інуангмін опублікували наукову працю [8], в якій зробили акцент на підхід до планування руху для зменшення коливання корисного навантаження в баштових кранах із подвійним маятниковим ефектом. Розробили композитний метод планування траєкторії. В результаті було представлено онлайн-метод планування траєкторії для двомаятничового баштового крана.

Чєн Хє, Фанг Йонгчун, Сун Нінг у своїй науковій публікації [9] сфокусувалися на адаптивному методі керування стеженням із придушенням коливання для системи баштових кранів із 4 ступенями свободи. Дослідниками було запропоновано адаптивний метод керування відстеженням, який забезпечує задовільну продуктивність відстеження невизначеності параметрів і зовнішні перешкоди. Використовуючи аналіз стійкості за Ляпуновим разом із принципом інваріантності Лассала, довели, що замкнута система є асимптотично стійкою. В підсумку проведеної наукової роботи дослідниками було розроблено ефективний метод контролера стеження та показано, що запропонована система відстеження може змусити візок і стрілу відстежувати різні типи траєкторій, а кути повороту системи можуть бути успішно придушені.

Дослідники Лју Жуоцинг, Ян Гу, Сун Нінг, Фанг Йонгчун опублікували наукову працю [10], в якій зробили акцент на методи планування траєкторії. Ними було запропоновано новий оптимальний метод планування траєкторії за часом, який є першим рішенням для генерації траєкторій проти гойдання для систем баштового крана. Зокрема, побудовано три допоміжні сигнали, а опорні траєкторії для повороту стріли та трансляції візка можна отримати за допомогою ретельно розроблених траєкторій, пов'язаних із допоміжними сигналами. В підсумку з практичної сторони дві групи апаратних експериментів підтверджують, що шляхом відстеження опорних траєкторій стріла та візок можуть точно досягати бажаних положень із швидким усуненням корисного навантаження за різних робочих вимог, крім того, усі змінні стану можуть бути обмежені певними діапазонами.

Наукові дослідники Чен Хе, Фанг Йонгчун, Сун Нінг у своїй статті [11] присвятили свій час розробці ефективного методу контролю стеження для системи баштового крана з 4 DOF. Надали загальну інформацію про застосування баштового крана у будівельному виробництві та пропоновані методи автоматичного керування. Описали детальну динамічну модель системи баштового крана та використання теорії пасивності для побудови відповідної формованої енергетичної позитивно визначеної функції як кандидата на функцію Ляпунова. На основі цієї функції запропоували адаптивний контролер стеження, що забезпечує належну продуктивність відстеження. Також у статті наводиться аналіз стійкості Ляпунова разом із принципом інваріантності Ласаля, що доводить асимптотичну стійкість замкненої системи. Нарешті, ряд імітаційних тестів моделювання було реалізовано для перевірки ефективності запропонованого методу. У підсумку розроблений метод є ефективним та базується на оригінальній моделі нелінійної системи без необхідності лінеаризації.

Алдан Тубаїде у своїй науковій роботі[12] поставив акцент на оптимальному плануванні робочого часу будівельного майданчика, що обслуговується одним баштовим краном. Так, було розроблено математичну модель для генерації операцій крана з оптимізацією робочого часу. В результаті представлено нову техніку для пошуку оптимального розташування крана та матеріалів для постачання, а також розроблено алгоритм для оцінки вантажопідйомності та максимальної швидкості підйому відповідно до графіків продуктивності реального крана, вибраного для вирішення числових прикладів для того, щоб забезпечити точне та реалізоване планування проекту.

Аналіз пошукового запиту "load trajectory planning" дозволить краще зрозуміти попит на цю тему та знайти ефективні рішення для планування траєкторій завантаження. Планування траєкторій є важливим елементом у процесі автоматизації промислових процесів та робототехніки. У цьому аналізі будуть розглянуті ключові тенденції та виклики у сфері планування траєкторій завантаження, а також найбільш ефективні методи та технології, що використовуються для досягнення мети планування траєкторій завантаження.

Дослідники Карбоне Джузеппе та Гомез-Браво Фернандо поставили перед собою завдання в дослідженні алгоритму планування шляху та траєкторії[13], де особливу увагу приділили створенню траєкторії, яка могла б виконуватися на високій швидкості, але в той же час нешкідлива для робота, з точки зору уникнення надмірних прискорень приводів і вібрації механічної конструкції. В підсумку розглянулися фундаментальні проблеми планування шляху та планування траєкторії в робототехніці, а також представлено огляд найбільш значущих методів, які можна знайти в літературі з робототехніки для створення шляхів без зіткнень.

Ван Лян, Ван Кежі, Пан Цуньхуа, Су Науман та Ханзо Лайось провели дослідження[14] з вивчення планування траєкторії на основі глибокого підсилення навчання для мобільних периферійних обчислень із підтримкою

кількох БПЛА. Для цього дослідниками було запропоновано структуру мобільних периферійних обчислень (МЕС) з бездротовим літальним апаратом (БПЛА), де кілька БПЛА з різними траєкторіями літають над цільовою зоною та підтримують обладнання користувача (UE) на землі. Результати моделювання показують, що запропонований алгоритм має значний приріст продуктивності порівняно з порівнюваними алгоритмами тестування.

Чай Руньді, Цурдос Антоніос, Савваріс Ал, Чай Сеньчун, Ся Юаньцзи та Чен Сі Ліп у науковій публікації[15] за для досягнення оптимального планування траєкторії космічного корабля і контролю його положення у реальному часі представили інтегровану структуру планування траєкторії та керування орієнтацією для польоту гіперзвукового апарату (HV) із шістьма ступенями свободи (6 DOF). Дана структура використовує дворівневу структуру, що включає десенсибілізовану оптимізацію траєкторії та керування на основі глибокої нейронної мережі. В підсумку була розроблена дворівнева схема керування, що включає покращений метод оптимізації траєкторії та DNN, щоб керувати польотом на вході HV, результати дослідження якої показали надійність в її використанні.

Фан Ї, Ху Цзе, Лю Ченьхай, Шао Куанкуан, Ці Цзін та Пен Інхон в публікації[16] запропонували плавне та оптимальне за часом планування траєкторії S-кривої для автоматизованих роботів і машин. Цей метод використовує кусково-сигмоїдну функцію для встановлення профілю ривка з відповідним чином вибраною тривалістю фази, так що згенеровані траєкторії нескінченно безперервно диференціюються за заданих обмежень на швидкість, прискорення та ривок. Автори показали, що даний метод відповідає вимогам високошвидкісної та надточної роботи роботизованих маніпуляторів у сучасних промислових застосуваннях. Таким чином, метод має здатність досягати контрольованого компромісу між часом виконання, плавністю руху та складністю обчислень, змінюючи обмеження прив'язки.

Дослідники Чен Хе, Фан Йончун та Сун Нін у своїй науковій праці [17] описали новий метод планування траєкторії та метод керування стеженням для мостових кранів з недостатнім приводом. Для досягнення цієї мети автори використовують диференціальну площинність для визначення плоского виходу системи та параметризують траєкторію візка як B-сплайн-криву. За допомогою методу поліноміальної підгонки визначають оптимальні параметри для траєкторії візка з урахуванням різних обмежень. Для підвищення ефективності відстеження розробили нелінійний закон керування на основі техніки лінеаризації зворотного зв'язку.

Крім того, автори надають деякі результати моделювання та експериментів, що допомагає підтвердити ефективність запропонованого методу.

Автори Чжан Сюебо, Фан Йончун та Сун Нін у своїй науковій праці [18] сфокусувалися на новому підході до планування траєкторії мінімального часу для мостових кранів із заниженим приводом, який враховує різні обмеження, такі як обмеження кута повороту, швидкості, прискорення та навіть ривок. Запропонований підхід використовує техніку квазіопуклої оптимізації, щоб знайти оптимальний шлях для мостового крану, який задовольняє всі обмеження.

Результати досліджень показали чудову продуктивність запропонованого методу в порівнянні з раніше опублікованими методами. Цей підхід може бути корисним для інженерних застосувань, оскільки забезпечує обмеження продуктивності, а саме, можливу найвищу ефективність для автоматичного або ручного керування мостовими кранами. Загальна мета цього дослідження полягає у покращенні продуктивності та ефективності транспортування за вимогами безпеки.

В сучасному будівництві, баштові крани є невід'ємною складовою підйому будівельних матеріалів та обладнання на висоту. Для ефективної та безпечної роботи баштового крана необхідно застосовувати оптимальні методи управління.

Одним з таких методів є оптимальне управління, яке полягає в знаходженні найкращого керування краном, щоб досягти максимальної продуктивності та

знизити витрати на енергію. У цьому аналізі ми дослідимо питання оптимального керування баштовим краном за допомогою пошукового запиту "tower crane optimal control". Ми проаналізуємо основні підходи та методи, що використовуються в оптимальному управлінні баштовим краном, а також розглянемо переваги та недоліки різних підходів.

Девессе Вім, Рамтін Маркус, Фен Лей, Вікандер Ян у своїй статті[19] поставили перед собою завдання для пошуку оптимального методу керування в режимі реального часу для безповоротних рухів баштового крана. В результаті

було розроблено оптимальний за часом метод керування швидкістю, який

забезпечує швидкі та вільні переміщення баштового крана шляхом застосування принципу максимуму Понтрягіна до набору маятникових рівнянь із роз'єднаним корисним навантаженням та розроблений до нього контролер у формі зворотного зв'язку, який реалізується в режимі реального часу. Представлені результати

показують, що контролер здатний керувати краном із дуже швидким часом підйому на поворотній швидкості, тоді як вібрації корисного вантажу активно зменшуються. Запропонований метод керування застосовний не лише до баштових кранів, але також може використовуватися для керування порталними/мостовими кранами.

Дослідники Солафшані А.Р., Аплевіч Дж.Д. сфокусували свою роботу на розрахунку оптимальних за часом траєкторій для баштових кранів[20]. Для цього було виведено математичну модель баштових кранів і проведено розрахунок їх оптимальних траєкторій за обмежень керування та стану, а також запропонували

субоптимальний контроль, щоб утримувати коливання навантаження незначними. В кінцевому результаті їх роботи отримано математичний опис крана з п'ятьма ступенями свободи, що дозволяє керувати положеннями твердих тіл. Встановили, що для того, щоб досягти швидкого переміщення вантажу, час руху слід мінімізувати з урахуванням бажаних граничних умов і фізичних обмежень щодо швидкостей і прискорень рухів крана.

Автори Омар Х.М., Найфех А.Х. у статті[21] сфокусувалися на керуванні зворотним зв'язком планування посилення для баштових кранів. Метою було побудувати алгоритм переміщення вантажу з точки в точку за найкоротший час, не викликаючи великих коливань. Для цього було створено контролери для спочатку для мостових кранів, а потім модифіковано для баштових кранів. Далі вже використовуються два контролери, один для обертового руху вежі, а інший для поступального руху візка. В результаті чисельного моделювання дослідники дійшли до того, що даний контролер є ефективним у зменшенні коливань навантаження та передачі навантаження за прийнятний час порівняно з оптимальним керуванням.

Досліджуючи питання нелінійного прогнозування керування баштовим краном з використанням підходу еталонного формування Баріса Тін, Баргулович Міховіл, Зузіч Горан, Ілес Сандор, Матушко Ядранко, Колонік Фетаг у своїй науковій праці[22] запропонували нелінійну модель прогнозованого керування баштовим краном на основі опорного формування. Для розрахунку опорного значення для внутрішнього контуру керування баштовим краном було використано контролер MPC. Запропонований підхід перевірено шляхом моделювання та експериментальних випробувань на лабораторній моделі тривимірного баштового крана, результати якого показують, що контрольне формування MPC у поєднанні з існуючими контролерами забезпечує швидке та точне позионування вантажу та запобігає значним коливанням вантажу. В підсумку можна сказати, що даний підхід дозволяє користувачеві зробити компроміс між придушенням коливань навантаження та швидкістю конвергенції системи до початку координат.

Роман Рауль-Крістіан, Прекуп Раду-Еміль, Петріу Еміль М. в науковій праці[23] над гібридним керування нечітким активним відхиленням збурень на основі даних для систем баштових кранів запропонували налаштування віртуального опорного зворотного зв'язку (VRFT) комбінації двох алгоритмів

керування Active Disturbance Rejection Control (ADRC) як репрезентативного керованого даними (або безмодельного) алгоритму керування та нечіткого керування, щоб використовувати переваги керованого даними керування та нечіткого керування. Відзначили, що основною перевагою цієї комбінації є автоматичне оптимальне налаштування незалежним від моделі способом параметрів комбінації активного керування. Для визначення ефективності нових гібридних керованих даними нечітких алгоритмів ADRC, їхня продуктивність експериментально порівнюється з двома алгоритмами керування, а саме з активним керуванням відхиленням завад із пропорційно-похідним нечітким керуванням Такагі-Сугено.

Омар Ханафі Мохаммед в публікації [24] поставили перед собою завдання в розробці надійних, швидких і практичних контролерів для порталних і баштових кранів, які будуть призначені для передачі навантаження від точки до точки якомога швидше, і в той же час для зберігання коливання навантаження незначимими під час процесу передачі та їх повне зникнення у місці призначення навантаження. Для відстеження дослідники використали PD-контролер, тоді як контролер проти коливання розроблено з використанням трьох різних методів: класичний PD-контролер, два контролери на основі техніки затримки зворотного зв'язку та нечітка логіка PREVIEW контролера, який відображає продуктивність контролера із затримкою зворотного зв'язку. Щоб перевірити розроблені контролери була побудована експериментальна установка. Хоча розроблені контролери ідеально працюють у комп'ютерному моделюванні, експериментальні результати є неприйнятними через високе тертя в системі. Це тертя погіршує реакцію системи, вводячи затримку часу, високу похибку сталого стану в положеннях візка та вежі, а також високі коливання залишкового навантаження. Щоб подолати тертя в моделі баштового крана, автори спочатку оцінили тертя, а потім застосували протилежну керуючу дію, щоб його скасувати.



Абосерр Лобна Т., Ель-Балаві Айман А. у науковій публікації[25] запропонували інтегральне керування режимом ковзання для баштових кранів, щоб забезпечити точне відстеження бажаного положення при зменшенні коливань корисного навантаження. Для цього було розроблено нелінійний надійний контролер на основі високоточної нелінійної динамічної моделі. Головною перевагою цього підходу полягає в зменшенні невизначеності моделі, що призводить до меншої вимоги до зусиль керування, які вимагатимуться контролером ковзного режиму. Ці контролери реалізовані для точного відстеження бажаного положення з одночасним гасінням коливань корисного навантаження під час швидких маневрів.

Автори Раушер Флорентін, Саводні Олівер опублікували наукову працю[26], в якій зробили акцент на моделюванні та керуванні баштовими кранами з пружною конструкцією. Була представлено нову концепцію контролю амортизації коливання для баштових кранів з верхнім поворотом, а також було відзначено, що через легку конструкцію їх жорсткість зазвичай обмежена, отже структурна еластичність повинна бути врахована при проектуванні керування. Введено детальну модель, що описує пов'язану динаміку пружної конструкції, навантаження, гнучкої мотузки та систем приводу. Встановлено, що використовуючи запропонований підхід до керування, можна надати допоміжні функції автоматизації водіям кранів, що може допомогти покращити безпеку роботи та вантажопідйомність у майбутньому.

Головне призначення баштових кранів полягає в обслуговуванні будівельних майданчиків, їх також використовують в доках, при розвантаженні кораблів. Баштові крани зручні в використанні, їхня конструкція дозволяє оператору вчасно виконувати необхідні керуючі рухи, щоб переміщувати вантаж по заданій траєкторії. Перед дослідниками постає ж питання планування траєкторії. Якісний аналіз можливостей крану, перешкод будівельного майданчика та, на цій основі, раціонально розроблена траєкторія руху вантажу

дозволяє збільшити продуктивність баштового крану, а також зменшити ризики при його переміщенні.

Проведення якісного аналізу наукових публікацій дослідників за темою відбувалося за використанням пошукових баз Scopus, Web of Science та Google Scholar. Було задано пошуковий запит «tower crane obstacle avoidance» (уникнення перешкод баштовим краном)

Проведемо аналіз наукових публікацій по тематичі планування траєкторії руху вантажу, що переміщується баштовим краном. Даний якісний аналіз наукових праць дозволить зрозуміти якими способами дослідники намагаються реалізувати вимогу уникнення перешкод під час переміщення вантажу.

Дослідники І. Гутьєррес і Х. Колладо [27] провели дослідження з вивчення динаміки баштового крану, при уникненні зіткнень з перешкодою. Для цього вони використали додаткову відтяжку (каната). Це дозволяє зменшити кількість помилок при переміщення вантажу, що позитивно вплинуло на уникнення перешкод.

Хе Чен, Пен Ян та Яньлі Ген у науковій публікації [28] для того, щоб досягнути можливості уникнення перешкод розробили траєкторії руху візка крана та траєкторію підйому/опускання вантажу. Дослідники розглядали пласку задачу. У результаті було запропоновано метод планування траєкторії для уникнення перешкод, який забезпечує швидке та точне позиціонування візка та усунення коливань вантажу.

Автори Акіра Іномата та Йошіюкі Нода опублікували наукову працю [29], в якій зробили акцент на методи планування траєкторії переміщення вантажопідйомного крана із двома ступенями вільності (модель мостового крана). Ними було запропоновано оптимізувати траєкторію руху вантажу виходячи із початкової можливої траєкторії. В результаті отримано рішення задачі, яке дозволяє зменшити витрати енергії та мінімізувати коливальну компоненту руху візка.

Каната Мацусави, Йошіюкі Нода та Акіхіро Канешіге в публікації [30] запропонували метод планування траєкторії руху вантажу з використанням поетапної оптимізації з урахуванням уникнення перешкод і усунення маятникових коливань вантажу. Вони провели експериментальні дослідження отриманих результатів за допомогою лабораторної моделі мостового крану. Дані експериментів підтвердили можливість застосування методу на практиці.

З проведеного якісного аналізу вище стає зрозумілим той факт, що питання уникнення перешкод при використанні баштового крану та й інших видів кранів є актуальним. Його вирішенням в основному займаються науковці азіатських країн, там де відбувається активні процеси будови мегаполісів.

Таким чином, провівши якісний аналіз наукових праць в галузі планування траєкторій руху вантажу, що переміщується баштовим краном, слід відзначити значну зацікавленість дослідників цим напрямком. Враховуючи той факт, що будівництво відбувається здебільшого у великих містах, де щільність будови досить значна, питання планування оптимальної траєкторії переміщення вантажу є невід'ємною складовою використання баштових кранів.

### Висновки до розділу 1:

У розділі було проведено кількісний та якісний аналіз наукових праць та патентних документів в галузі планування траєкторії руху вантажу, що переміщується баштовим краном.

За результатами кількісного аналізу було встановлено, що кількість наукових публікацій на цю тему почала стрімко зростати з 2017 року і продовжує зростати дотепер. Основні напрямки досліджень включають розробку нових методів планування руху вантажу, вдосконалення існуючих алгоритмів, а також застосування різноманітних математичних методів.

Кількісний аналіз патентних документів показав, що патентна активність в цій галузі також зростає, проте кількість патентних заявок на даний час менша, ніж кількість наукових публікацій.

Якісний аналіз наукових праць дозволив встановити, що в даній галузі існує багато проблем, які вимагають подальшого дослідження та розробки нових методів. Зокрема, проблеми пов'язані з підвищенням точності планування траєкторій, підвищенням продуктивності роботи крану, управлінням краном в умовах змінних параметрів, а також зі зменшенням витрат енергії на переміщення вантажу.

Отже, на основі проведеного аналізу можна зробити висновок, що тема планування траєкторій руху вантажу, що переміщується баштовим краном, є актуальною та потребує подальшого дослідження та розробки нових методів.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

## РОЗДІЛ 2

# ПОБУДОВА ЗАКОНІВ РУХУ МЕХАНІЗМІВ ЗМІНИ ВІЛЬОТУ ВАНТАЖУ І ПОВОРОТУ КРАНУ

Рух вантажу баштовим краном є складним завданням, яке вимагає побудови плавної траєкторії, що оминатиме різноманітні перешкоди. Оскільки баштові крани використовуються на великих будівництвах, такі перешкоди можуть значно ускладнити переміщення вантажу. Тому головною метою даного розділу є розробка законів руху вантажу у трьох наближеннях для побудови ефективної траєкторії, яка буде пальною та безпечною. Кожне наближення буде вдосконалювати показники траєкторії та забезпечувати можливість практичної реалізації. У цьому розділі будуть розглянуті ключові аспекти побудови законів руху механізмів зміни вильоту вантажу і повороту крану, які забезпечать безперебійну та ефективну роботу баштового крана на будівництві.

## 2.1. Побудова законів руху механізмів зміни вильоту вантажу і повороту крану у першому наближенні

Механізмом називається механічна система, призначена для перетворення руху одного або кількох тіл в задані рухи інших тіл. Любий механізм складається з окремих деталей. Кожна рухома деталь або група деталей, що утворюють одну жорстку рухому систему називається рухомою ланкою. Рух цих ланок досліджується по відношенню до нерухомої ланки, або стояка. В стаціонарних механізмах стояком є вся система нерухомих деталей, а в транспортних машинах – деталі, жорстко пов'язані з корпусом машини.

На першому етапі роботи було задано вихідні дані для проведення розрахунків, які дадуть змогу отримати закони руху механізмів баштового крана: зміни вильоту вантажу та повороту крана. Результати цих розрахунків є першим

наближенням у розв'язанні задачі побудови режимів руху вказаних механізмів, за яких виконуються переміщення вантажу із певної точки робочого простору у іншу точку. При цьому ставиться вимога уникнення певної перешкоди, координати якої також задано. Критерієм побудови маршруту (траєкторії) переміщення вантажу є мінімальна його довжина.

Вихідними даними для проведення розрахунків є:

- координати початку траєкторії:  $x_0=13$  м;  $y_0=8$  м;
- координати перешкоди, яку необхідно обійти:  $x_{obs}=12$  м;  $y_{obs}=14$  м;
- координати кінця траєкторії:  $x_{fin}=5$  м;  $y_{fin}=16$  м;

Відлік системи координат розміщений у місці стоянки багаторовнового крана.

Вище наведені координати дають нам змогу побудувати графік розміщення відповідних точок (рис. 2.1).

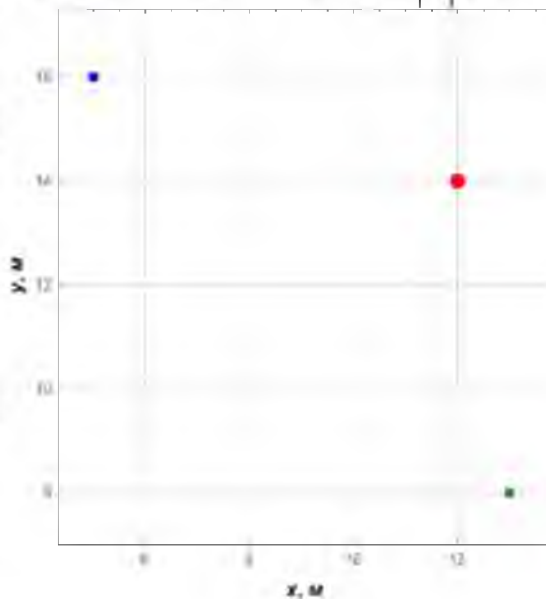


Рисунок. 2.1 – Графік розміщення точок початку траєкторії руху вантажу (зелена точка), кінця траєкторії (синя точка) та точка, яка відповідає перешкоді (червона).

На другому етапі постає питання побудови траєкторії руху вантажу у першому наближенні. Маючи координати відповідних точок доцільно (з точки

зору досягнення мінімальної довжини траєкторії) траєкторію руху вантажу представити як дві прямолінійні ділянки, які описуються наступними функціями:

$$y_{first part} = y_{obs} + (y_0 - y_{obs}) \frac{x_{obs} - x}{x_{obs} - x_0} \quad (2.1)$$

$$y_{sec part} = y_{fin} + (y_{obs} - y_{fin}) \frac{x_{fin} - x}{x_{fin} - x_{obs}} \quad (2.2)$$

Надалі представимо отримані результати за допомогою графіків (рис. 2.2)

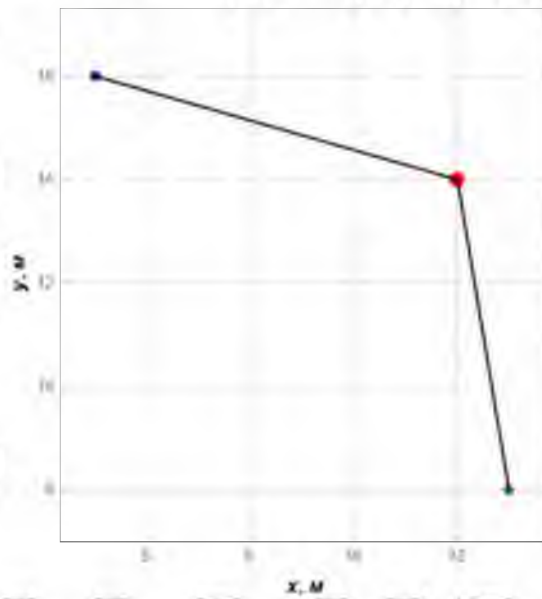


Рисунок. 2.2 – Траєкторія руху вантажу у першому наближенні

Третім етапом роботи є дискретизація ділянок (2.1) та (2.2). Дискретизація передбачає перетворення функцій неперервних змінних у функції дискретних змінних, по яких вихідні неперервні функції можуть бути відновлені із заданою точністю. Роль дискретних відліків виконують, як правило, квантовані значення функцій у дискретній шкалі координат. В даному випадку поділ прямої ділянки руху крану виконувався із кроком 1 мм для забезпечення точності подальших розрахунків.

Для дискретизації ділянок траєкторії руху вантажу (2.1) та (2.2) потрібно насамперед визначити довжини окремих ділянок. Використовуючи теорему

Піфагора визначимо довжини окремих ділянок траєкторії за допомогою формул наведених нижче:

– довжина першої ділянки:

$$L_1 = \sqrt{(x_{obs} - x_0)^2 + (y_{obs} - y_0)^2} = \sqrt{(12 - 13)^2 + (14 - 8)^2} = 6,083 \text{ м} \quad (2.3)$$

– довжина другої ділянки:

$$L_2 = \sqrt{(x_{fin} - x_{obs})^2 + (y_{fin} - y_{obs})^2} = \sqrt{(6 - 12)^2 + (16 - 14)^2} = 7,28 \text{ м} \quad (2.4)$$

Для більш точного відображення встановлюємо кількість точок дискретизації траєкторії на один метр траєкторії  $n=1000$  (як було зазначено вище крок дискретизації рівний 1 мм). Визначені раніше довжини ділянок дають нам змогу дізнатися кількість дискретних точок на окремих ділянках траєкторії: для першої ділянки кількість складатиме  $6,083 \cdot 1000 = 6083$ , а для другої  $7,280 \cdot 1000 = 7280$ .

В результаті було отримано координати точок окремих ділянок по всій довжині траєкторії руху вантажу. Графічне представлення отриманих результатів не будемо проводити, оскільки візуально воно буде співпадати із рис. 2.2 через велику кількість точок на траєкторії.

Отримавши дискретні значення положень вантажу можемо переходити до наступного (четвертого) етапу, що передбачає розрахунки узгоджених законів руху механізмів повороту крана та переміщення візка.

Спочатку задамо загальні характеристики руху вантажу по траєкторії:

- швидкість руху вантажу по траєкторії  $v=0,2$  м/с;
- крок дискретизації за часом  $\Delta t=0,1$  с.

Крок дискретизації за часом в 0,1 с було обрано саме через те, що саме такий крок реалізується за допомогою частотних перетворювачів, які будуть керувати механізмами повороту крана та зміни вильоту вантажу (переміщення візка).



Таким чином, загальна тривалість руху по траєкторії визначається за формулою:

$$T_{заг} = \frac{L_{заг}}{v} = \frac{L_1 + L_2}{v} = \frac{13,363}{0,2} = 66,815 \text{ с} \quad (2.5)$$

де  $L_{заг}$  – загальна довжина траєкторії руху вантажу у першому наближенні.

Можемо отримати кількість точок дискретизації  $u$  положення вантажу на траєкторії:

$$u = \frac{T_{заг}}{\Delta t} = \frac{66,815}{0,1} \approx 668 \quad (2.6)$$

Із використанням виразів (2.1) та (2.2) отримано координати точок на траєкторії руху вантажу. Їх можна представити у наступному вигляді:

$$P_i(x_i, y_i), \quad i = 0 \dots u \quad (2.7)$$

Після проведених розрахунків проводимо розрахунок узгоджених положень візка (лінійна координата вздовж стріли) та стріли (кутова координата).

Тобто переходимо від декартових координат (координати робочої зони крана) до полярних координат, які пов'язані із механізмами багтового крана (при цьому вважаємо, що початки координат обох систем співпадають) [31]:

$$r_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \quad (2.8)$$

$$\varphi_i = \arctg\left(\frac{x_i}{y_i}\right) \quad (2.9)$$

де  $r_i$  та  $\varphi_i$  – дискретні координати положення візка на стрілі (відносно осі її обертання) та кутове положення стріли. У результаті отримано масиви положень візка і стріли, які були представлені на рис. 2.3.

Отримавши дискретні значення положень візка та стріли, було проведено розрахунок дискретних значень їх швидкостей. Для цього було використано поліноміальний фільтр Савицького-Голяя [32]. Розраховані дискретні швидкості механізмів представлені на графіку (рис. 2.4).

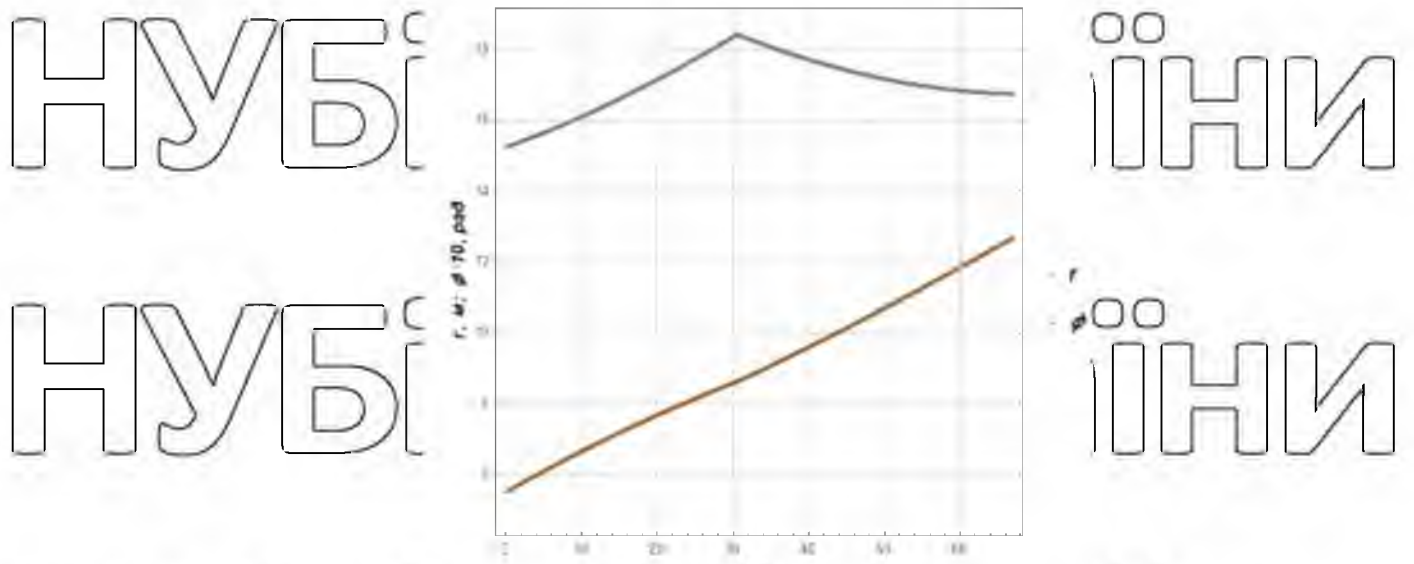


Рисунок 2.3 – Графічне зображення лінійного положення візка та кутового положення стріли баштового крана

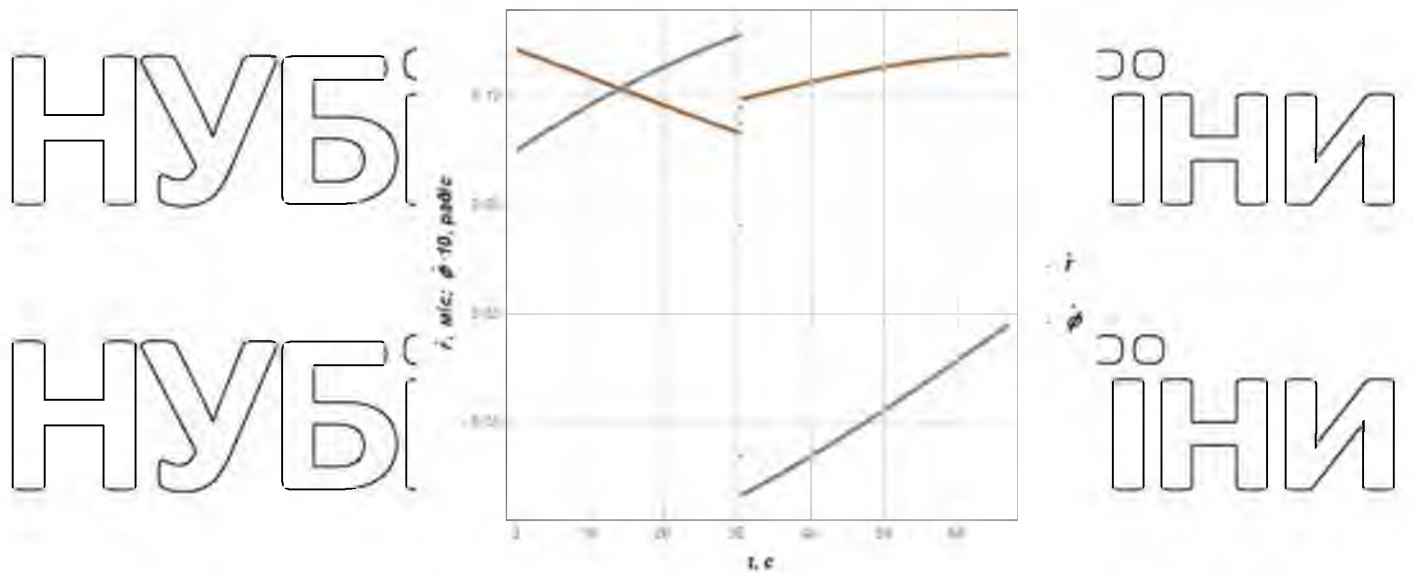


Рисунок 2.4 – Графічне зображення лінійної швидкості руху візка та кутової швидкості повороту стріли баштового крана

НУБІП України

Таким чином, провівши розрахунки для побудови законів руху механізмів зміни вильоту вантажу і повороту крану у першому наближенні можна сказати, що дані закони неможливо фізично реалізувати на практиці.

На рис. 2.4 ми можемо побачити, як змінюються швидкості механізму зміни вильоту вантажу та швидкості механізму повороту крану. Так, швидкість механізму зміни вильоту вантажу на початку руху здійснює значний ривок, після чого надалі повільно набирає швидкість (рух на першій ділянці перешкоди). Після проходження першої ділянки руху до перешкоди відбувається різке зменшення швидкості під час проходження перешкоди. Таку зміну швидкості фізично неможливо здійснити на практиці. Також на рис. 2.4 спостерігається знакозмінний характер швидкості руху візка (на першій ділянці руху була додатна швидкість, а на другій – від’ємна). Це також не відповідає можливій реалізації цього закону на практиці.

Враховуючи вищесказане, необхідно вирішувати проблеми наявності розривів функцій швидкості повороту крана та переміщення візка, а також суміщення окремих ділянок траєкторій у точці їх сполучення, тобто точки із координатами  $(x_{obs}, y_{obs})$ .

## 2.2. Побудова законів руху механізмів зміни вильоту вантажу і повороту крану у другому наближенні

При побудові законів руху механізмів зміни вильоту вантажу і повороту крану у першому наближенні було отримано дві прямі ділянки: перша відповідала руху вантажу до перешкоди, а друга – після неї. Ці дві ділянки з’єднуються під певним кутом, що говорить нам про неможливу реалізацію такого варіанту руху вантажу. Виходячи з цього постає завдання в заміні другої ділянки так, щоб вона спрягалася з першою ділянкою під кутом 180 градусів, що зробить можливим практичну реалізацію руху вантажу.

Для початку потрібно визначити кут між двома прямолінійними ділянками. Для визначення кута потрібно дізнатися тангенс кута нахилу для першої та другої ділянки траєкторії. Визначення тангенсів кутів нахилу першої та другої ділянок здійснюється за допомогою формул:

для першої ділянки руху вантажу:

$$k_1 = \frac{y_{obs} - y_0}{x_{obs} - x_0} \quad (2.10)$$

для другої ділянки руху вантажу:

$$k_2 = \frac{y_{fin} - y_{obs}}{x_{fin} - x_{obs}} \quad (2.11)$$

Далі отримаємо кут між двома прямими:

$$\alpha = \arctg \left( \frac{k_1 - k_2}{1 + k_1 \cdot k_2} \right) \quad (2.12)$$

Визначаємо тангенс кута нахилу ділянки спряження, яка заміняє другу ділянку руху вантажу, та спрощуємо отриманий вираз:

$$\operatorname{tg}(\tilde{\alpha}) = \operatorname{tg} \left( \pi - \operatorname{Arctg} \left( \frac{k_1 - k_2}{1 + k_1 \cdot k_2} \right) \right) = \frac{x_{obs}(y_0 - y_{fin}) + x_0(y_{fin} - y_{obs}) + x_{fin}(-y_0 + y_{obs})}{(x_0 - x_{obs})(x_{fin} - x_{obs}) + (y_0 - y_{obs})(y_{fin} - y_{obs})} \quad (2.13)$$

Наступний крок полягає у визначенні закону, який буде описувати другу ділянку – ділянку, що буде плавно сполучатись із першою ділянкою. Для цього розв'яжемо наступну крайову задачу:

$$\begin{cases} y_2(x) \in 0; \\ y_2(0) = 0, \dot{y}_2(0) = \operatorname{tg}(\tilde{\alpha}), \ddot{y}_2(0) = 0; \\ y_2(L_2) = 0, \dot{y}_2(L_2) = 0, \ddot{y}_2(L_2) = 0, \end{cases} \quad (2.14)$$

де  $L_2$  – довжина другої ділянки у першому наближенні ( $L_2 = \sqrt{(x_{fin} - x_{obs})^2 + (y_{fin} - y_{obs})^2}$ ). Така крайова задача обрана саме через те, що вона забезпечує бажані умови руху на другій ділянці траєкторії, а саме: ділянки перша у друга будуть сполучатись під кутом 180 градусів, а вихід у кінцеву точку (місця адресації вантажу) буде виконуватись плавно.

Розв'язок крайової задачі (2.14) має наступний вигляд:

$$v_2 = \operatorname{tg}(\bar{\alpha})x \left( 1 + \frac{x^2(-3x^2 + 8x/l_2 - 6l_2^2)}{l_2^4} \right) \quad (2.15)$$

В результаті проведених розрахунків за формулами було виконано заміну другої прямолінійної ділянки на іншу уточнену ділянку, яка відповідає можливості практичної реалізації руху вантажу. Нижче на рис. 2.5 представлена візуалізація даної оновленої ділянки, яка відповідає виразу (2.15).

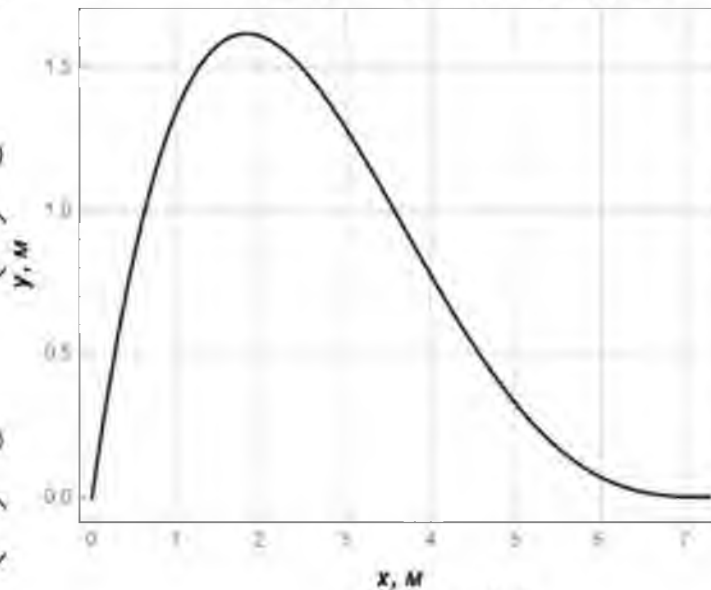


Рисунок 2.5 – Графічне зображення закону руху по другій уточненій ділянці

Після отриманні оновленої другої ділянки руху її слід поєднати з першою ділянкою. Але як видно з рис. 2.5 її необхідно повернути. Для того, щоб змінити її напрямок проводимо дискретизацію другої уточненої ділянки і після цього вектори, що описують координати дискретних значень (точок) траєкторії множимо на матрицю повороту. У результаті отримаємо ділянку повернуту на потрібний кут. Крім того, віднесемо кожен вектор дискретної ділянки у точку перешкоди  $(x_{obs}, y_{obs})$ . Такі розрахунки описуються наступним виразом:

$$\begin{bmatrix} x_{2,i,yмов} \\ y_{2,i,yмов} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{2,i} \\ y_{2,i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\arctg(k_2)) & \sin(\arctg(k_2)) \\ \sin(\arctg(k_2)) & \cos(\arctg(k_2)) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{obs} \\ y_{obs} \end{bmatrix}, \quad (2.16)$$

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

Наступний етап полягає в дискретизації ділянок траєкторії руху вантажу. В пункті 2.1 вже проводилася дискретизації ділянок. Перша ділянка залишається незмінною, а для другої ділянки, яка була замінена, слід провести розрахунки

спочатку. Для розрахунку довжини другої ділянки траєкторії використовуємо теорему Піфагора, формули якої наведено нижче

$$L_{2, \text{уточ}} = \int_0^{x_2} \sqrt{1 + (y_2'(x))^2} dx = 8,348 \text{ м} \quad (2.17)$$

Для визначених ділянок встановлюємо кількість точок дискретизації траєкторії на один метр траєкторії для більш точного їх відображення  $n=1000$  (крок дискретизації рівний 1 мм). Кількість дискретних точок за таких умов для першої ділянки складатиме  $6,083 \cdot 1000 = 6083$ , а для другої  $8,348 \cdot 1000 = 8348$ .

Графічне представлення отриманих результатів представлено на рис. 2.6, який показує першу ділянку траєкторії руху, що залишилася незмінною та другу ділянку, яка була замінена.

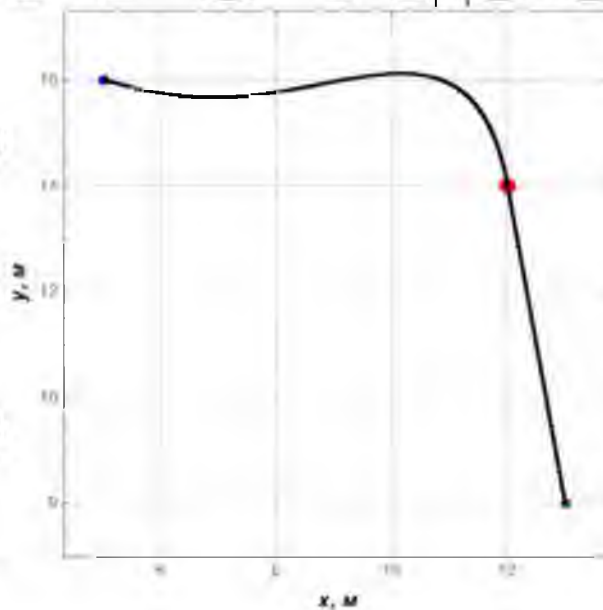


Рисунок 2.6 – Графічне зображення оновленої траєкторії руху вантажу

Наступним етапом є розрахунок законів керування механізмів повороту крана та переміщення візка. Для цього використовуємо загальні характеристики руху вантажу по траєкторії, які були задані в п. 2.1:

- швидкість руху вантажу по траєкторії  $v=0,2$  м/с;
- крок дискретизації за часом  $\Delta t=0,1$  с.

Загальна тривалість руху по траєкторії визначається за формулою:

$$T_{заг} = \frac{L_{заг}}{v} = \frac{L_1 + L_{п.змов}}{v} = \frac{14,431}{0,2} = 72,155 \text{ с} \quad (2.17)$$

де  $L_{заг}$  – загальна довжина траєкторії руху вантажу у другому наближенні.

Виходячи з розрахованої тривалості руху можемо визначити кількість точок дискретизації  $n$  положення вантажу на траєкторії:

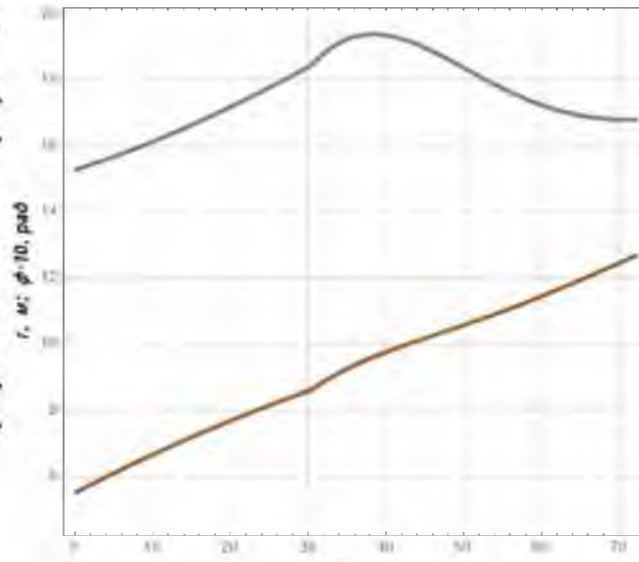
$$n = \frac{T_{заг}}{\Delta t} = \frac{72,155}{0,1} \approx 722 \quad (2.18)$$

Після проведених розрахунків проводимо розрахунок узгоджених положень візка (лінійна координата вздовж стріли) та стріли (кутова координата). Це виконується аналогічно як це було зроблено у п. 2.1. У результаті отримано масиви положень візка і стріли, які були представлені на рис. 2.7.

Отримавши дискретні значення положень візка та стріли, було проведено розрахунок дискретних значень їх швидкостей. Для цього було використано поліноміальний фільтр Савицького-Голея [32]. Розраховані дискретні швидкості механізмів представлені на графіку (рис. 2.8).

НУБ

НУБ



їни

їни

НУБ

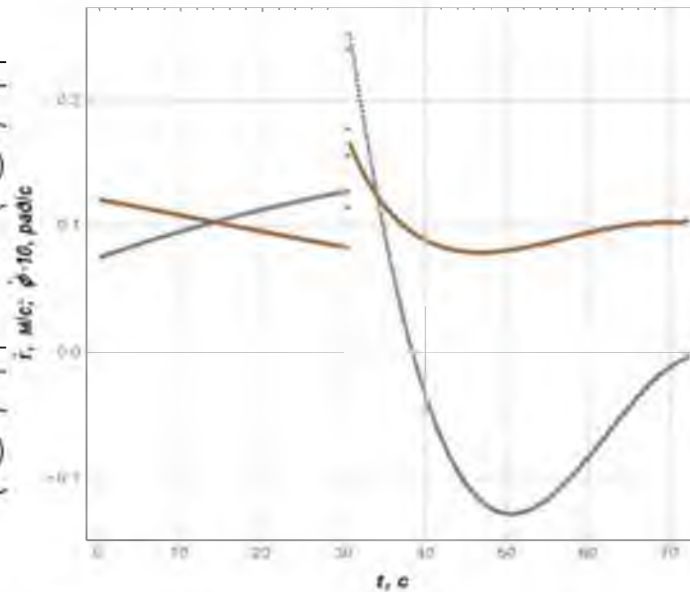
 $t, c$ 

їни

Рисунок 2.7 – Графічне зображення лінійного положення візка та кутового положення стріли баштового крана

НУБ

НУБ



ни

ни

НУБ

Рисунок 2.8 – Графічне зображення лінійної швидкості руху візка та кутової швидкості повороту стріли баштового крана

НУБ

 $t, c$ 

ни

НУБІП України



Ідеальна довжина траєкторії (ламана лінія із двох прямих) рівна 13,363 м.  
 Реальна довжина траєкторії (перша і уточнена друга ділянки) рівна 14,431 м, що на 7,99% більше довжини ідеальної траєкторії.

Таким чином, в процесі побудови законів руху механізмів зміни вильоту вантажу і повороту крану у другому наближенні можна сказати те, що розриви у законах зміни швидкості руху механізмів, які були присутні в першому наближенні, так і залишилися. Однак, зникла зміна знаку швидкості руху візка і зменшилась величина розриву у законі швидкості його руху.

Підсумовуючи можна сказати, що дві вимоги щодо покращення закону руху вантажу були дотримані: перша – траєкторія руху тепер є плавною (без кутів спряження), а друге – значно зменшився перепад (розрив) швидкості візка. Однак, розрив швидкості повороту стріли збільшився, що є негативним фактором, який потребує подальших досліджень.

### 2.3. Побудова законів руху механізмів зміни вильоту вантажу і повороту крану у третьому наближенні

При побудові законів руху механізмів зміни вильоту вантажу і повороту крану у першому і другому наближенні була визначена дискретна траєкторія руху вантажу. На цій дискретній траєкторії було обрано певні ділянки та визначено кількість точок (позицій вантажу), щоб забезпечити рух вантажу таким чином, що перехід між окремими ділянками відбувається плавно. Для цього використано понижену швидкість руху по траєкторії за допомогою якої вантаж проходить точку спряження ( $v_{\min}=0,5v=0,1$  м/с).

В п. 2.1 і 2.2 на графіках швидкостей руху механізмів (рис. 2.4, рис. 2.8) видно миттєвий розгін, проходження точки спряження без зменшення швидкості та миттєве гальмування. Такий характер руху суперечить фізичним принципам процесу переміщення вантажу. Саме тому в розрахунки необхідно ввести

перехідні процеси, кожен з яких буде тривати 4 с. Всього в процесі переміщення вантажу по траєкторії буде 4 перехідних процесів: розгін зі стану спокою до номінальної швидкості руху вантажу по траєкторії, гальмування вантажу з номінальної швидкості до пониженої (вихід на точку спряження), розгін з пониженої швидкості до номінальної (зхід з точки спряження), гальмування з номінальної швидкості до зупинки вантажу. Показники швидкості руху вантажу по траєкторії та крок дискретизації за часом залишаються при цьому незмінними.

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

таким чином:

$$L_{\text{пер}} = 2 \cdot \frac{v \cdot t_1}{2} + 2 \cdot \frac{(v + v_{\text{мін}}) \cdot t_1}{2} = 2 \cdot \frac{0,2 \cdot 4}{2} + 2 \cdot \frac{(0,2 + 0,1) \cdot 4}{2} = 2 \text{ м} \quad (2.19)$$

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

Слід відзначити, що при переході з номінальної на понижену швидкість вантаж буде проходити більшу відстань, ніж у випадку переходу з номінальної швидкості до повної зупинки. Це спричинено тим, що при такому переході вантаж не припиняє рухатись.

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

$$T_{\text{заг}} = \frac{L_{\text{заг}} - L_{\text{пер}}}{v} + T_{\text{пер}} = \frac{14,43172 - 2}{0,2} + 16 = 78,155 \text{ с} \quad (2.20)$$

Загальна тривалість перехідних процесів складе:

$$T_{\text{пер}} = 4 \cdot t_1 = 4 \cdot 4 = 16 \text{ с} \quad (2.21)$$

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

$$u = \frac{T_{\text{заг}}}{\Delta t} = \frac{78,155}{0,1} = 781,55 \approx 782. \quad (2.22)$$

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

$$t_2 = \frac{L_1 - \frac{v \cdot t_1}{2} - \frac{(v + v_{\min}) \cdot t_1}{2}}{v} + t_1 = \frac{6,083 - \frac{0,2 \cdot 4}{2} - \frac{(0,2 + 0,1) \cdot 4}{2}}{0,2} + 4 = 29,415 \text{ c} \quad (2.23)$$

Момент досягнення проміжної швидкості:

$$t_3 = t_2 + t_1 = 29,415 + 4 = 33,415 \text{ c} \quad (2.24)$$

Момент закінчення розгону з проміжної швидкості до номінальної:

$$t_4 = t_3 + t_1 = 33,415 + 4 = 37,415 \text{ c} \quad (2.25)$$

Момент початку гальмування з номінальної швидкості до зупинки:

$$t_5 = T_{\text{аз}} - t_1 = 78,155 - 4 = 74,155 \text{ c} \quad (2.26)$$

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:

$$\frac{n t^2 (2t + 3t_1) v \Delta t}{t_1^3}, t_1 \geq t \geq 0;$$

$$n \cdot v \cdot \Delta t, t_2 \geq t > t_1;$$

$$\Delta s \approx \frac{1}{(t_2 - t_3)^3} n \left( (t - t_3)^2 (2t - 3t_2 + t_3) v + (t - t_2)^2 (2t + t_3 - 3t_3) v_{\min} \right) \Delta t, t_3 \geq t > t_2;$$

$$\frac{1}{(t_3 - t_4)^3} n \left( (t - t_3)^2 (2t + 3t - 3t_4) v + (t - t_4)^2 (2t - 3t_3 + t_4) v_{\min} \right) \Delta t, t_4 \geq t > t_3;$$

$$n \cdot v \cdot \Delta t, t_5 \geq t > t_4;$$

$$\frac{n(t - T)^2 (2t + T - 3t_5) v \Delta t}{(T - t_5)^3}, T \geq t > t_5,$$

(2.29)

де  $\Delta s$  – крок переміщення вантажу протягом часу  $\Delta t$ ,  $t_2$  – моменту переходу від номінальної швидкості на проміжну швидкість;  $t_3$  – момент досягнення проміжної швидкості;  $t_4$  – моменту переходу від проміжної швидкості на

номінальну швидкість;  $t_2$  – момент початку гальмування механізмів. Величина  $\Delta s$  – цілийчисельна, що показує знак заокруглення до цілого числа „ $\approx$ ”. Її зміна показана на рис. 2.9.

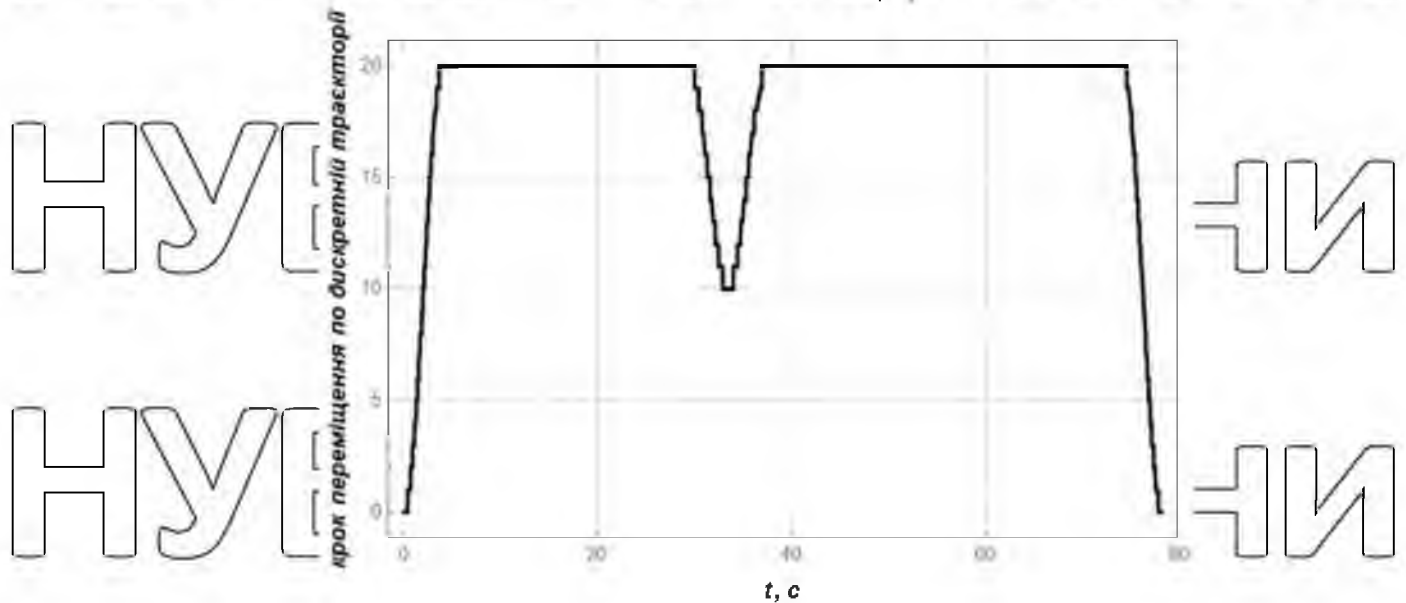


Рисунок 2.9 – Графічне зображення кроку переміщення  $\Delta s$  протягом періоду руху вантажу по траєкторії

Рис. 2.9 чудово демонструє моменти часу, які були визначені вище. Так, момент часу  $t_1$  починається на 4 с. В цей момент  $\Delta s=20$ , що відповідає досягненню вантажу номінальної швидкості 0,2 м/с. Далі рух вантажу по траєкторії на номінальній швидкості триває до моменту  $t_2$ , коли починається перехід від номінальної швидкості на проміжну швидкість. При цьому  $\Delta s$  плавно зменшується з 20 до 10. В момент часу  $t_3$  вантаж досягає проміжної швидкості 0,1 м/с (дно графіка на рис. 2.9). В момент часу  $t_4$  швидкість вантажу знову досягає номінальної. Це триває до моменту часу  $t_5$ , буде коли буде відбуватися гальмування з номінальної швидкості до стану спокою.

Виходячи з цього можна сказати, що при русі на номінальній швидкості вантажу потрібно проходити 20 мм за 0,1 секунду між посланнями команд, що

відповідас номінальній швидкості 0,2 м/с. Команди посилаються з частотою в 0,1 секунду. Це означає, що вантаж за 1 секунду пройде відстань у 2 см.

Після проведених розрахунків проводимо розрахунок узгоджених положень візка (лінійна координата вздовж стріли) та стріли (кутова координата).

Методика розрахунку подібна до тієї, яка була описана вище (у п. 2.1) і тому не будемо зупинятись на ній детально. У результаті отримано масиви положень візка і стріли, які були представлені на рис. 2.10.

Отримавши дискретні значення положень візка та стріли, було проведено розрахунок дискретних значень їх швидкостей, для чого, як і у попередніх

випадках, використано поліноміальний фільтр Савицького-Голея[32].

Розраховані дискретні швидкості механізмів представлені на графіку (рис. 2.11)

Таким чином, під час побудови законів руху вантажу у грєсах наближеннєх вдалося прийти до значного покращення характеристик руху вантажу. Фінальна

траєкторія руху, яка зображена на рис. 2.11, це наглядно показує.

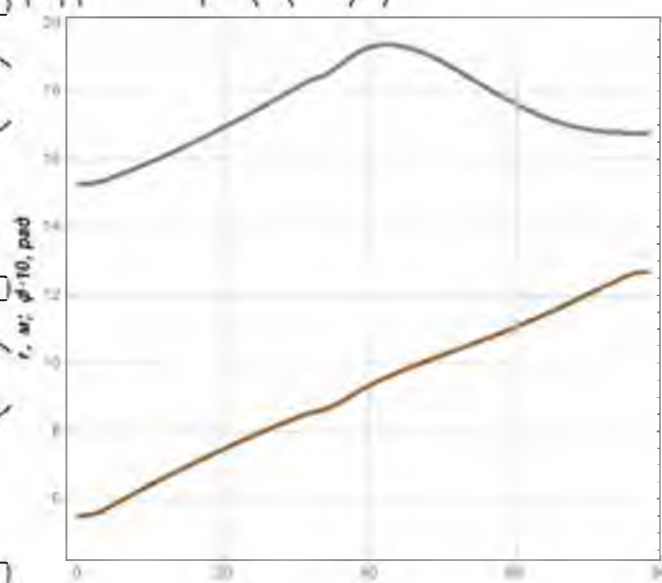


Рисунок 2.10 – Графічне зображення лінійного положення візка та кутового положення стріли баштового крана

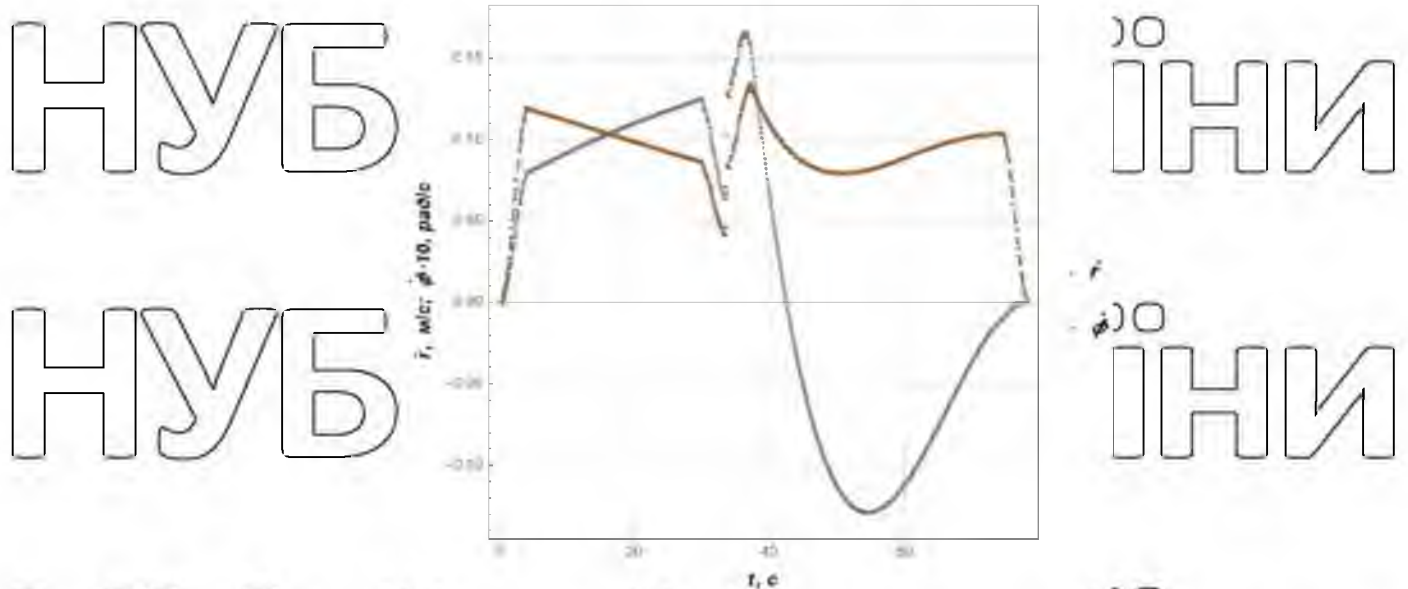


Рисунок 2.11 – Графічне зображення лінійної швидкості руху візка та кутової швидкості повороту стріли баштового крана

Якщо в першому наближенні розгін та гальмування відбувався миттєво, то зараз вже ми маємо плавний розгін та плавне гальмування. Перепади швидкостей все ж залишаються, але вони не значні (табл. 2.1).

Таблиця 2.1

Характеристики руху механізмів для трьох наближень побудови траєкторії

Показник	Наближення у розрахунку траєкторії руху вантажу		
	перше	друге	третє
Механізм повороту крана			
Перепад швидкості при розгоні, м/с	0,12	0,12	0,00
Перепад швидкості у точці спряження, м/с	0,20	0,10	0,03
Перепад швидкості при гальмуванні, м/с	0,12	0,10	0,00
Знакозмінний характер швидкості механізму, так/ні	Ні	Ні	Ні
Механізм переміщення візка			
Перепад швидкості при розгоні, м/с	0,08	0,08	0,00
Перепад швидкості у точці спряження, м/с	0,05	0,12	0,07
Перепад швидкості при гальмуванні, м/с	-0,08	0,00	0,00
Знакозмінний характер швидкості механізму, так/ні	Так	Ні	Ні

З таблиці 2.1, видно, що при з кожним наближенням у розрахунку траєкторії руху вантажу показники ставали все кращими. Так, перепад швидкості механізму повороту при розгоні в першому наближенні склав 0,12 м/с, а вже в третьому наближенні взагалі немає перепаду. Аналогічна ситуація склалася з перепадами швидкості при гальмуванні. Перепади швидкості у точці спряження в третьому наближенні показали покращення у порівнянні з першим наближенням, але незначне погіршення у порівнянні з другим наближенням, а саме перепад зріс на 0,01 м/с.

Щодо механізму переміщення візка, то ситуація схожа. Маємо покращення за показником величини перепаду швидкості у точці спряження. Перепади при розгоні та гальмуванні у третьому наближенні відсутні. Також вдалося позбутися знакозмінного характеру швидкості механізму, який був присутній у першому наближенні. З цього можна сказати те, що завдяки побудові траєкторії в трьох наближеннях вдалося значно покращити умови руху вантажу по траєкторії та механізмів повороту крана і переміщення візка по стрілі.

Підсумовуючи можна сказати, що за рахунок раціонально побудованої траєкторії вдалося обійти перешкоду. Більше того, це вдалося виконати при русі вантажу по плавній траєкторії. Механізми плавно розганяються та плавно гальмують. Однак, все ще присутні перепади швидкостей під час обходження перешкоди в точці спряження, що слід віднести до недоліків розв'язку задачі.

### Висновки до розділу 2:

1) проведено побудову траєкторії руху вантажу, яка забезпечує обхід перешкоди, плавний рух вантажу по траєкторії та узгоджений рух механізмів повороту крана та переміщення візка. Для цього виконано багатоетапні розрахунки побудови найпростішої (і такого, що неможливо реалізувати на практиці) траєкторії руху вантажу. Після цього проведено

дискретизацію ділянок на траєкторії та отримано закони зміни швидкості механізмів баштового крана:

- 2) для забезпечення практичної реалізації руху вантажу проведено заміну другої ділянки траєкторії шляхом відшукування поліноміального закону руху, який має наперед задані бажані властивості, його дискретизацію та поворот отриманого масиву векторів на заданий кут. В результаті отримано плавну траєкторію руху вантажу, яка характеризується відсутністю кутів спряження та зменшеними, у порівнянні із результатами першої ітерації розрахунку траєкторії, перепадами (розривами) швидкості візка;
- 3) у результаті виконання третього уточнення траєкторії було враховано рух механізмів на перехідних ділянках (розгін, гальмування, зміна швидкості). Це дало змогу покращити показники руху, наприклад, досягти нульових початкової та кінцевої швидкостей обох механізмів;
- 4) всі розрахунки дали змогу отримати узгоджені у часі закони руху механізмів повороту крана та переміщення візка, які у практичному плані будуть реалізовані за допомогою застосування частотних перетворювачів. При цьому номінальна швидкість руху вантажу по траєкторії складе 0,2 м/с, а команди керування частотними перетворювачами будуть відправлятися через кожні 0,1 с;
- 5) розроблена методика є загальною і її можна застосовувати для розрахунку траєкторій руху вантажу інших конфігурацій.



## РОЗДІЛ 3

# НУБІП України

## БАШТОВИЙ КРАН: ОПИС, ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ

### 3.1 Опис баштового крану та його технічні характеристики

Баштовий кран є невід'ємною частиною сучасних виробничих процесів і складських операцій. Важливо зрозуміти технічні характеристики та особливості його роботи, щоб забезпечити ефективне керування та безпечність робіт. У цьому питанні розглядаються основні компоненти баштового крану, такі як механізми зміни вильоту та повороту, а також технічні характеристики, які включають виліт, робочу зону вильоту, вантажопідйомність, потужність приводу та передаточні числа.

Основні технічні характеристики моделі баштового крану представлені в таблиці 3.1 [БЗ].

Таблиця 3.1  
Технічні характеристики баштового крану

№	Показник	Величина
1	Висота підйому вантажу (довжина гнучкого підвісу), м:	
	- максимальна	1,8
	- мінімальна	1,0
2	Виліт вантажу крана, м:	
	- максимальний	3,14
	- мінімальний	1,90
3	Вантажопідйомність крана, кг:	
	- на максимальному вильоті вантажу	5,6
	- на мінімальному вильоті	14
4	Номінальна потужність двигуна, Вт:	
	- механізму повороту крана	180
	- механізму переміщення візка	60
	- механізму підйому	132
5	Номінальна швидкість обертання двигуна, об/хв:	
	- механізму повороту крана	885

	- механізму переміщення візка	1380
6	Передаюче число:	
	- механізму повороту крана	153,5
	- механізму переміщення візка	63
7	Номинальна швидкість:	
	- повороту крана, рад/с	0,159
	- переміщення візка, м/с	0,38
8	Маса візка, кг	1,7
9	Діаметр канатного барабана механізму переміщення візка, м	0,0334

Нижче наведені рисунки, які відображають різні компоненти та аспекти бантового крану та його системи управління:



Рисунок 3-1 – Загальний вигляд установки бантового крану



Рисунок 3.2 Деталі механізму повороту моделі баштового крану

а)



НУБІП України

НУБІП України

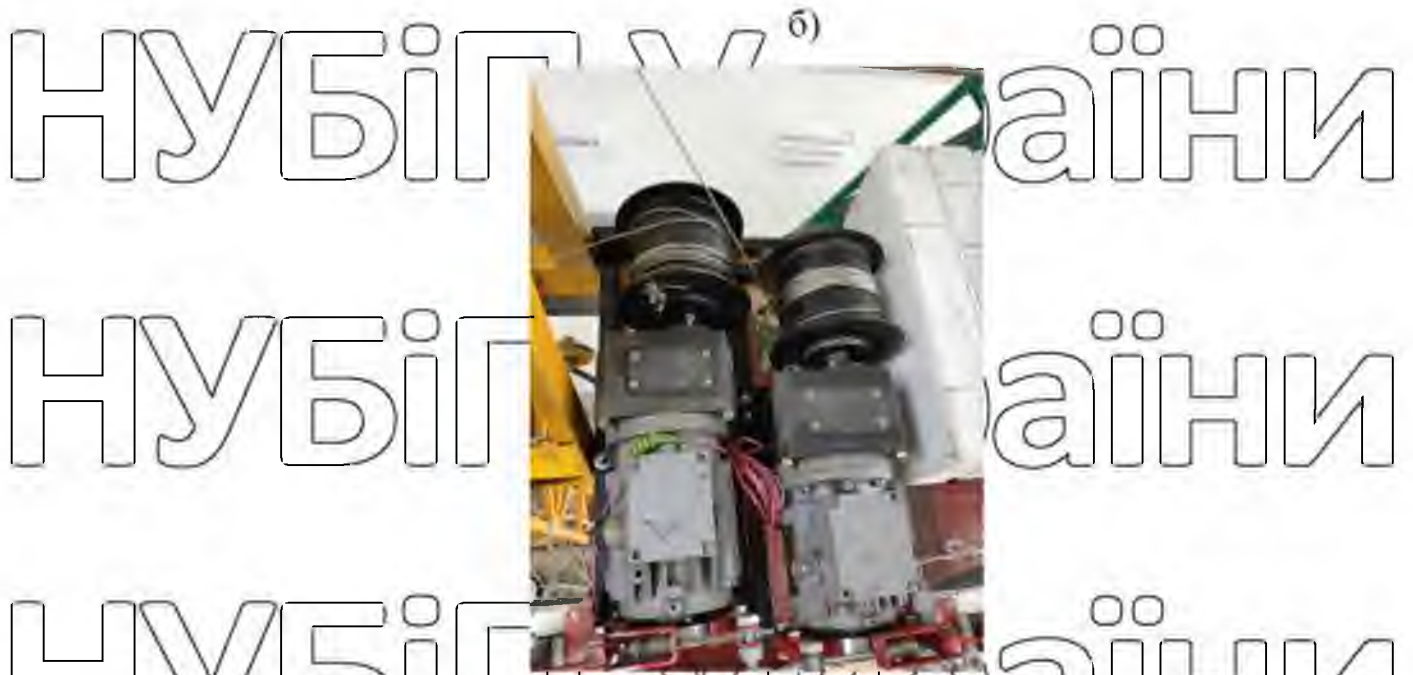


Рисунок 3.3 – Механізм переміщення візка на моделі баштового крану: а) вигляд збоку; б) вигляд зверху

### 3.2 Опис програмного забезпечення для керування механізмом баштового крану

Після запуску програми для керування механізмом баштового крану, першим кроком буде вибір порта для обміну даними між комп'ютером та частотними перетворювачами. Частотні перетворювачі відіграють важливу роль у регулюванні швидкості руху механізмів крану, таких як стріла, гак та інші важелі.

В нашому випадку ми використовуємо COM порт (від англ. Communication Port), який є стандартним портом передачі даних на більшості комп'ютерів. COM порти можуть мати різні номери, наприклад, COM1, COM2, COM3 тощо в залежності від налаштувань та обладнання комп'ютера.

Щоб виконати вибір порта, слідкуйте за такими кроками:

1. Запустіть програму керування механізмом баштового крану.

2. На головному екрані програми знайдіть розділ «Вибір порту».

3. У списку доступних портів виберіть COM-порт, який відповідає COM-порту комп'ютера.

4. Збережіть зміни, натиснувши кнопку «Відкрити» попередньо обраний порт.

Тепер програма зможе успішно взаємодіяти з частотними перетворювачами через обраний COM-порт. Нижче наведений рисунок 3.1, який відображає процес вибору порту для забезпечення зв'язку між комп'ютером та перетворювачем частоти.

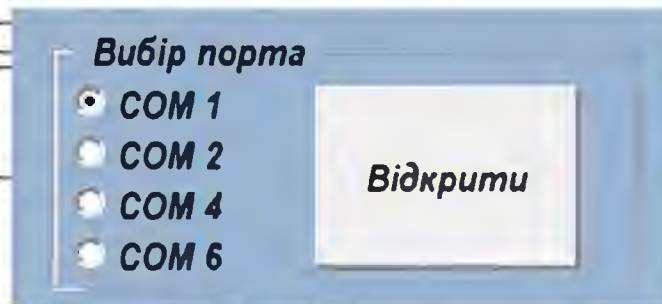


Рисунок 3.5 – Вибір комунікаційного порту

Після успішного відкриття COM-порту, наступним кроком є вибір способу керування перетворювачем частоти (ПЧ). У програмі доступні два основних режими керування:

**EXT (External)** – зовнішнє керування. В цьому режимі керування перетворювачем частоти здійснюється безпосередньо з комп'ютера, відключаючи локальне управління через кнопки на самому перетворювачі.

**NET (Network)** – керування за допомогою мережі. У цьому режимі керування ПЧ відбувається за допомогою локальної мережі або Інтернету, дозволяючи керувати пристроєм з віддаленого розташування.

Щоб активувати режим NET, слідкуйте за такими кроками:

1. Відкрийте програму керування механізмом баштового крану.

2. На головному екрані програми знаходимо розділ «Керування ПЧ».

3. Вибераємо "NET (Network)" зі списку доступних режимів керування.

4. Зберігаємо зміни, натиснувши кнопку «Встановити»

Після активації режиму NET, ПЧ буде керуватися з комп'ютера, і не відкликатиметься на кнопки на самому пристрої. Відтепер, ПЧ виконуватиме команди, які надходитимуть через комп'ютер.

У режимі зовнішнього керування користувач зможе встановлювати параметри швидкості, напрямку руху, прискорення, гальмування та інші налаштування, що впливають на роботу баштового крану. Також буде доступний моніторинг стану ПЧ, відображення діагностичних даних та аналіз можливих

проблем, що сприятиме підвищенню ефективності та безпеки роботи обладнання.

Також, в режимі NET, користувач зможе налаштувати різні сценарії роботи, зберігати та завантажувати їх, що дозволить оптимізувати процеси роботи з баштовим краном для різних завдань та умов.

Після завершення роботи з ПЧ у режимі NET слід відключити зовнішнє керування, щоб повернутись до локального управління через кнопки на самому перетворювачі.

Загалом, використання програмного забезпечення для керування механізмом баштового крану значно спрощує процеси роботи, підвищує продуктивність та забезпечує високий рівень безпеки. Завдяки гнучким налаштуванням та можливості віддаленого керування, програми для керування ПЧ стають незамінним інструментом для інженерів та фахівців у сфері будівництва та індустрії.

Нижче наведений рисунок 3.2., який відображає процес вибору типу керування перетворювачем частоти для забезпечення оптимальної роботи механізму баштового крану.

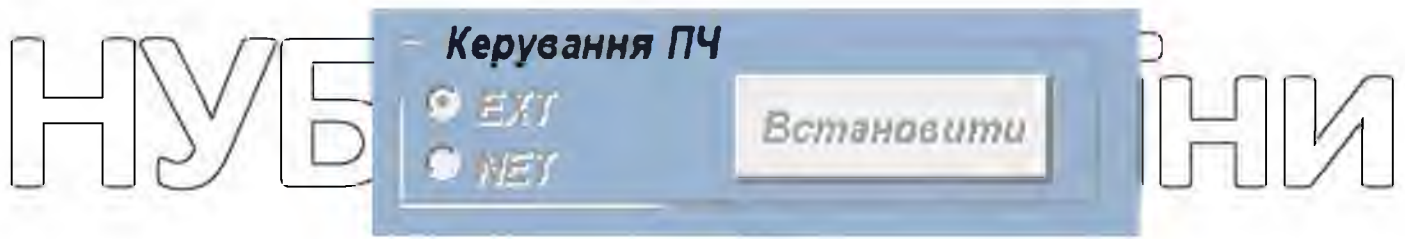


Рисунок 3.7 – Вибір режиму керування ПЧ

У програмі керування механізмом баштового крану налаштовується два масиви координат, які відповідають за рух візка крану по осях X та Y.

Вимірювання координат проводиться в мікрометрах для високої точності та контролю руху крану.

Ці два масиви відображають координати, які візок має займати протягом певного часу та кута повороту стріли баштового крану. Це дозволяє забезпечити плавний та контрольований рух візка відповідно до заданих параметрів.

Щоб налаштувати масиви координат, слід зробити наступне:

1. Відкрийте програму керування механізмом баштового крану.
  2. На головному екрані програми перейти до розділу «Координати руху», де будуть дві колонки з координатами для осей X та Y.
  3. Для введення нових координат, виберіть потрібну комірку у відповідній колонці X або Y та введіть значення в мікрометрах.
  4. Збережіть зміни, натиснувши кнопку «Встановити».
- Після введення координат відбудеться розрахунок шляху руху візка крану, а програма відправить команди на перетворювач частоти для контролю швидкості, напрямку та прискорення руху візка.

Таким чином, завдяки використанню масивів координат, керування механізмом баштового крану стає більш точним і ефективним. Користувач може задавати різні параметри руху візка для різних ситуацій, що дозволяє оптимізувати процеси роботи з краном та підвищити безпеку експлуатації обладнання.

Нижче наведений рисунок 3.3, який відображає процес встановлення координат в руху для оптимального переміщення візка та механізму повороту баштового крану

**– Координати руху**

<b>вісь X, мкм</b>	<b>вісь Y, мкм</b>
2660000	10000
2660000	10000
2660000	10000
2660000	10000
2660000	10000
2660000	10000
2659670	10944
2659341	11888

**Встановити**

Рисунок 3.8 – Встановлення координатів руху

В програмі керування механізмом баштового крану присутні два графіки, які будуються на основі заданих даних та допомагають візуалізувати роботу крану.

1. **Трасекторія руху вантажу:** Перший графік відображає траєкторію руху вантажу в просторі відповідно до заданих координат. Це допомагає оператору крану чітко розуміти шлях руху вантажу та контролювати його переміщення. Завдяки візуалізації траєкторії, користувач може попередньо перевірити правильність заданих координат, а також виявити можливі зіткнення або перешкоди на шляху руху вантажу.

2. **Швидкість переміщення візка та механізму повороту:** Другий графік відображає швидкість переміщення візка та механізму повороту крану, яка вимірюється в герцах. Цей графік дозволяє користувачеві аналізувати динаміку руху крану, визначати оптимальну швидкість для забезпечення



ефективності та безпеки роботи. Графік також допомагає виявити можливі проблеми з швидкістю, які можуть виникнути через несправність або некоректні параметри перетворювача частоти.

Ці графіки розташовані праворуч від панелі керування, що дозволяє користувачам легко спостерігати за траєкторією руху вантажу та швидкістю переміщення візка та механізму повороту в реальному часі, одночасно виконуючи налаштування та керування через панель керування. Це забезпечує зручний та ефективний спосіб контролю та аналізу роботи механізму баштового крану.

Користуючись цими графіками, користувач може забезпечити ефективність та безпеку роботи з баштовим краном. Вони допомагають оператору крану регулярно перевірити та оптимізувати параметри руху перед початком роботи, а також контролювати процеси переміщення вантажу під час роботи крану.

Завдяки візуалізації на графіках, фахівці зможуть аналізувати результати роботи крану, виявляти можливі проблеми та вдосконалювати параметри керування для підвищення ефективності та безпеки роботи з баштовим краном.

Використання програмного забезпечення для керування механізмом баштового крану, зокрема візуалізація графіків траєкторії руху вантажу та швидкості переміщення візка та механізму повороту, дозволяє інженерам та операторам крану отримати більш повний контроль над процесами роботи та забезпечити високий рівень продуктивності та безпеки.

Нижче наведені рисунки 3.4. та 3.5., які відображають траєкторію руху вантажу для оптимального переміщення візка та механізму повороту баштового крану та швидкість переміщення візка та механізму повороту для забезпечення оптимальної роботи механізму баштового крану відповідно.

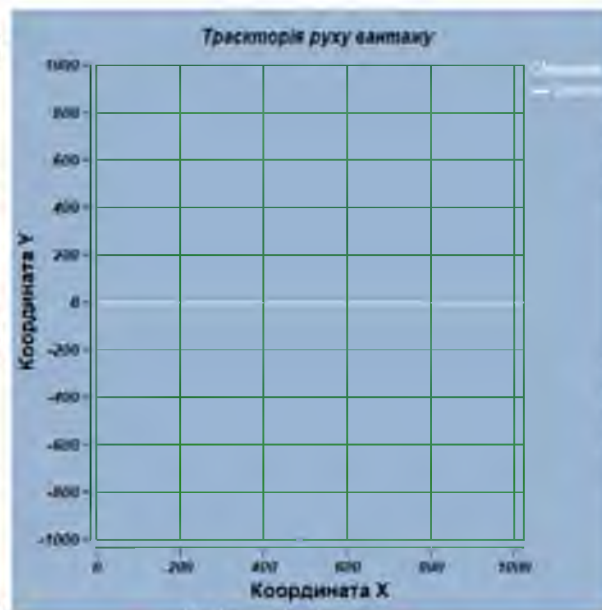


Рисунок 3.9 – Траєкторія руху вантажу

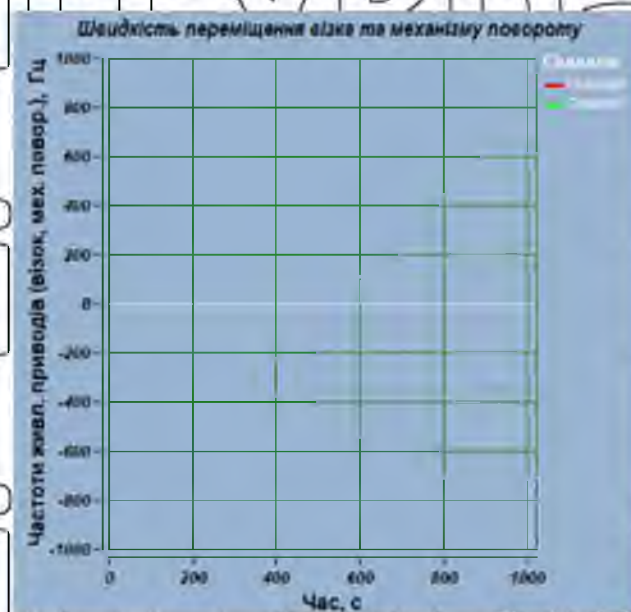


Рисунок 3.10 – Швидкість переміщення в'їзка та механізму повороту

У підсумку можна сказати, що програмне забезпечення для керування механізмом баштового крану відіграє важливу роль в оптимізації та контролі роботи крану. Воно забезпечує зручний доступ до різних параметрів керування, дозволяє встановлювати координати руху, вибирати режими керування ПЧ, а

також візуалізувати траєкторію руху вантажу та швидкість переміщення візка та механізму повороту.

Використання програмного забезпечення підвищує продуктивності та безпеки роботи з баштовим краном, оскільки воно допомагає операторам крану та інженерам аналізувати результати роботи, виявляти можливі проблеми та вдосконалювати параметри керування.

Таким чином, програмне забезпечення для керування механізмом баштового крану є необхідним інструментом для забезпечення ефективності та безпеки роботи в галузі будівництва та інших сферах, де використовуються кранові установки.

### 3.3. Частотні перетворювачі: принципи роботи та особливості застосування

В сучасних системах керування вантажопідіймними машинами активно застосовуються частотні перетворювачі, які забезпечують гнучке та ефективне керування електродвигунами. В даному дослідженні використовуються частотні перетворювачі Mitsubishi Electric марок FR-D700 та FR-E700, що відповідають за керування механізмами переміщення візка та повороту крана.

Технічні характеристики цих частотних перетворювачів наведені в таблиці 3.2 [34]. Вони включають параметри, такі як потужність, номінальний вихідний струм, допустима тривалість перевантаження, діапазон вихідних частот, час розгону/гальмування та інші.

Таблиця 3.2

Технічні характеристики частотних перетворювачів

Параметр	Одиниці вимірювання	FR-D700	FR-E700
Потужність	кВт	3,7	2,2

Номинальний вихідний струм	A	8	6
Допустима тривалість перевантаження:			
– при 150% перевантаженні	с	60	60
– при 200% перевантаженні	с	3	3
Напруга живлення	B	380	380
Діапазон вихідних частот	Гц	0,2...400	0,2...400
Час розгону/гальмування	с	0,1...3600	0,1...3600
Тип характеристики розгону/гальмування	-	лінійна, S-подібна, подвійна S-подібна	лінійна, S-подібна, подвійна S-подібна
Керування	-	зовнішнє, керування з пульта, комп'ютерне	зовнішнє, керування з пульта, комп'ютерне
Ступінь захисту	-	IP 20	IP 20
Охолодження	-	примусове повітряне	примусове повітряне

Усе електрообладнання, включаючи частотні перетворювачі, встановлено у спеціальній шафі, яка підключається до електромережі з номінальною напругою 380 В. Шафа оснащена автоматичним вимикачем, пускачами та розетками для підключення електродвигунів.

Нижче наведений рисунок, який відображає компоненти шафи з двома частотними перетворювачами, що використовуються у системі управління баштового крану:

НУБІП Україна



Рисунок 3.11 – Зовнішній вигляд шафи з двома частотними перетворювачами

Керування приводами механізмів може здійснюватися в ручному режимі за допомогою відповідних кнопок на шафі або автоматично через частотні перетворювачі. При переході від ручного керування до керування через частотні перетворювачі, електродвигуни підключаються до вихідних контактів пускачів, а подальше керування виконується виключно за допомогою частотних перетворювачів.

Використання частотних перетворювачів Mitsubishi Electric FR-D700 та FR-E700 дозволяє оптимізувати процес керування сходовим краном, забезпечуючи гнучкість, точність та енергоефективність у роботі електродвигунів механізмів переміщення візка та повороту крана. Ці частотні перетворювачі можуть працювати одночасно або окремо, забезпечуючи можливість адаптації системи керування до різних режимів роботи крана.

Крім того, застосування частотних перетворювачів серії FR-D700 та FR-E700 сприяє зниженню механічного зносу та підвищенню ресурсу роботи механізмів крана. Частотні перетворювачі дозволяють забезпечити плавний пуск

та зупинку електродвигунів, що зменшує динамічні навантаження на конструкції крана та підвищує безпеку його експлуатації.

Слід зазначити, що системи керування на основі частотних перетворювачів дозволяють інтегрувати додаткове обладнання та програмне забезпечення для автоматизації процесів керування та моніторингу стану крана. Такі системи можуть включати різні сенсори, контролери та інтерфейси для забезпечення зв'язку з оператором крана або навіть інтеграції з автоматизованими системами управління виробничим процесом.

Зміна частоти і ефективного значення напруги живлення електродвигунів механізмів здійснюється за допомогою керування з комп'ютера (подробіці про програмне забезпечення, яке використовується для цього, були розглянуті раніше). Сигнали керування передаються від комп'ютера до частотних перетворювачів через інформаційні кабелі. Передача сигналів відбувається у форматі USB (на виході комп'ютера), який далі конвертується в формат RS-232 та надходить на порт відповідного частотного перетворювача [33].

У підсумку, застосування частотних перетворювачів Mitsubishi Electric FR-D700 та FR-E700 у системі керування баштовим краном суттєво покращує ефективність та надійність його роботи, відкриваючи нові можливості для автоматизації та оптимізації вантажопідйомних операцій.

### **3.4 Підготовка та калібрування датчиків перед проведенням експерименту**

Процес підготовки до експерименту є важливим етапом роботи, оскільки він дає можливість чітко спланувати всі кроки дослідження та врахувати можливі проблеми, що можуть виникнути під час проведення експерименту. Відповідна підготовка дозволяє вчасно визначити та забезпечити потрібне обладнання,

матеріали та інструменти, а також забезпечує більшу точність отриманих результатів і ефективність використання часу та ресурсів.

На початку підготовки до експерименту було обрано датчик (акселерометр). З метою дослідження принципу роботи цього датчика, було

проведено розбір його конструкції. Процес розбору полягав у знятті захисної

кришки, що дало змогу вивчити пляхи підключення проводів до плати та виходи

до конектора. Для визначення функцій окремих проводів було використано

мультиметр. Спочатку датчик було під'єднано до подовжувача, а подовжувач -

до блоку живлення. Оскільки датчик розрахований на напругу від 5 до 12 В (ця

інформація була отримана з надпису на платі під час її розбору), то живлення

було встановлено на рівень 10 В. Після підключення до блоку живлення, за

допомогою мультиметра було встановлено, який провід від датчика відповідає

проводу подовжувача на виході. У даному випадку проводи мали наступну

конфігурацію: «+» - позитивний провід живлення, «-» - негативний провід

живлення, «y» та «z» - проводи, які передають інформацію про стан датчика або

виконують інші функції, в залежності від типу датчика. Нижче на рис. 3.12

наведено розібраний датчик:



a)



б)

Рисунок 3.12 – Фото розібраного датчика, що демонструє його внутрішню структуру та компоненти: а) передня частина плати; б) задня частина плати.

Наступним етапом підготовки до експерименту було калібрування датчика по осям «у» та «z». Згідно з інформацією на наліпці датчика, встановлено, що ось «у» відповідає за переміщення по площині, а ось «z» відповідає за підняття вгору чи вниз. На рисунку 3.13 представлено датчик з інформаційною наліпкою.



Рисунок 3.13 – Інформаційна наліпка на датчику з описом функцій осей «у» та «z».



Процес калібрування датчика розпочався з встановлення напруги в трьох положеннях для кожної осі. Для осі «у» були зміряні напруги в положеннях  $+90$  (маркування у+ вгорі, напруга 3,128 В),  $-90$  (маркування у- вгорі, напруга 1,521 В) та 0 (датчик на ребрі з горизонтальною лінією, напруга 2,347 В). Аналогічно, для осі «z» калібрування проводилося в наступних положеннях:  $+90$  (датчик лежить на столі, маркування z+ вгорі, напруга 1,611 В), 0 (датчик лежить на столі під кутом  $90$  градусів, на ребрі, напруга 2,417 В) та  $-90$  (маркування z- вгорі, напруга 3,209 В). Цей процес калібрування допоміг визначити характеристики датчика в різних положеннях та підготувати його до використання в експерименті.

Враховання цих даних дозволить отримати більш точні та надійні результати під час проведення досліджень з використанням цього датчика.

Після успішного проведення калібрування, наступним завданням було перетворення отриманої напруги на значення прискорення. Для реалізації цього кроку необхідно було отримати відповідну формулу перетворення. Використовуючи програму Wolfram Mathematica, ми змогли отримати потрібні формули, використовуючи функцію Fit для апроксимації залежностей між напругою та прискоренням. Результати перетворення напруги в прискорення представлені нижче на рисунках 3.14. та 3.15.

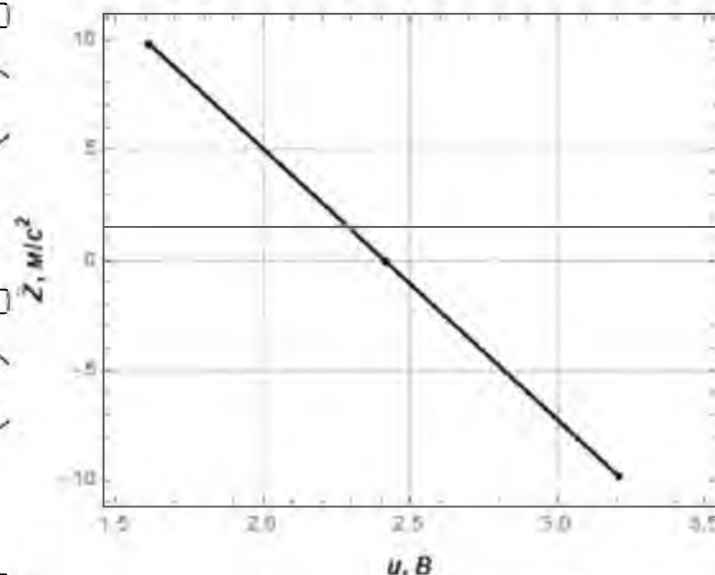


Рисунок 3.14 – Графік співвідношення перетворення напруги в прискорення для

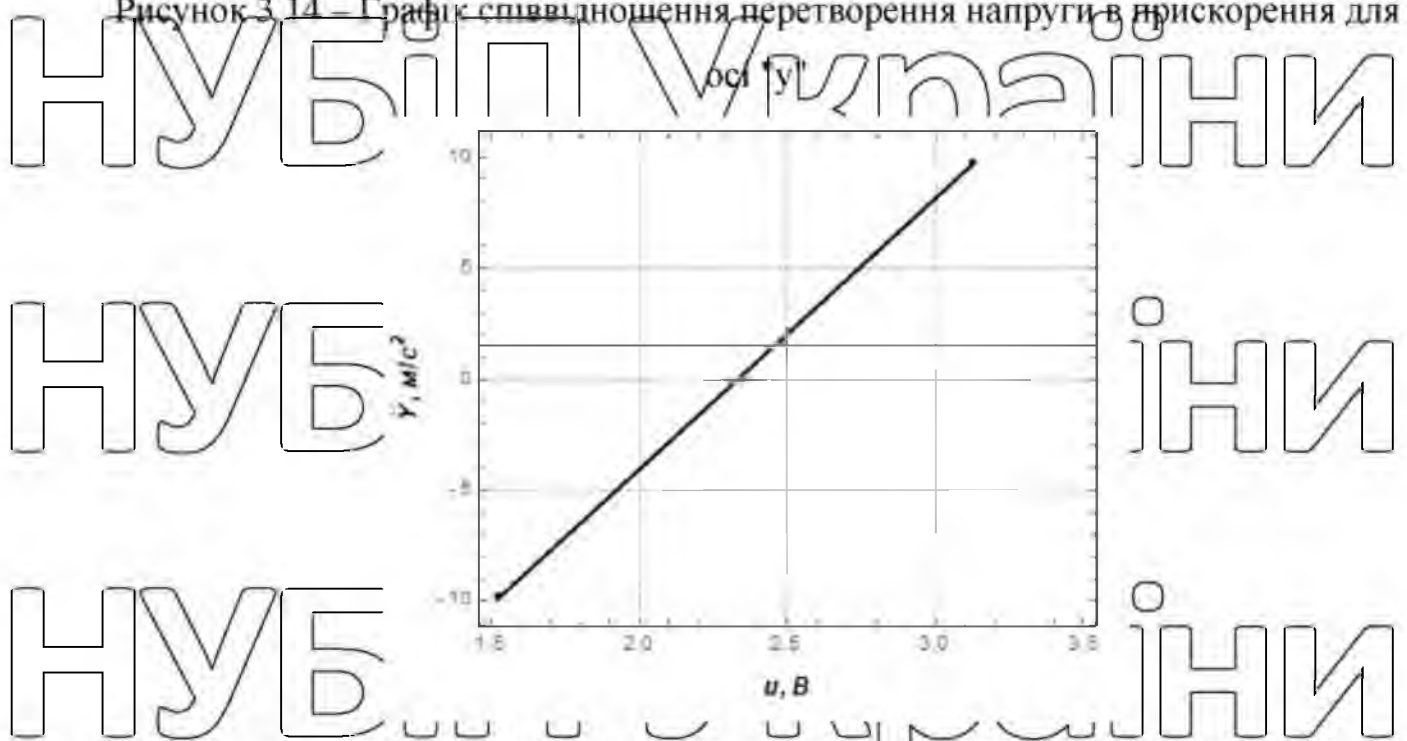


Рисунок 3.15 – Графік співвідношення перетворення напруги в прискорення для осі "z"

Після отримання формул та графіків для перетворення напруги в прискорення, було проведено тестування датчика відносно осей «y» та «z» для перевірки його працездатності. Для вимірювання показників переміщення датчика було використано восьмиканальний пристрій збору даних mDAQ з 14-бітним аналого-цифровим перетворювачем (АЦП). Контроль роботи m-DAQ 14 та налаштування параметрів (встановлення частоти опитування сигналів, вибір каналів для зчитування даних, форматування даних та візуалізація сигналів по каналам тощо) здійснювалися за допомогою програмного забезпечення mDAQ14 Reader під час проведення експериментальних досліджень, який зображений на рисунку нижче.



Рисунок 3.16 – Інтерфейс програмного забезпечення mDAQ14 Reader для контролю та збору даних з датчиків

Отримані сигнали конвертуються в цифровий формат та надсилаються на персональний комп'ютер у форматі текстового файлу (txt). Відмітимо, що такий формат даних легко імпортувати та використовувати у програмі для обробки експериментальних результатів, такої як Wolfram Mathematica. Цей етап роботи включає підготовку даних для подальшого аналізу та інтерпретації результатів експерименту з використанням відповідного програмного забезпечення.

Отримані в текстовому форматі (txt) сигнали після проведення тестового експерименту були імпортовані до програми Wolfram Mathematica для подальшого аналізу та обробки. Внаслідок обробки та фільтрації зібраних даних, було отримано графік, який ілюструє переміщення датчика по площині вздовж осі «у». В ході експерименту датчик перемістився на відстань 21 см, що підтверджується графіком, представленим на рисунку 3.17.

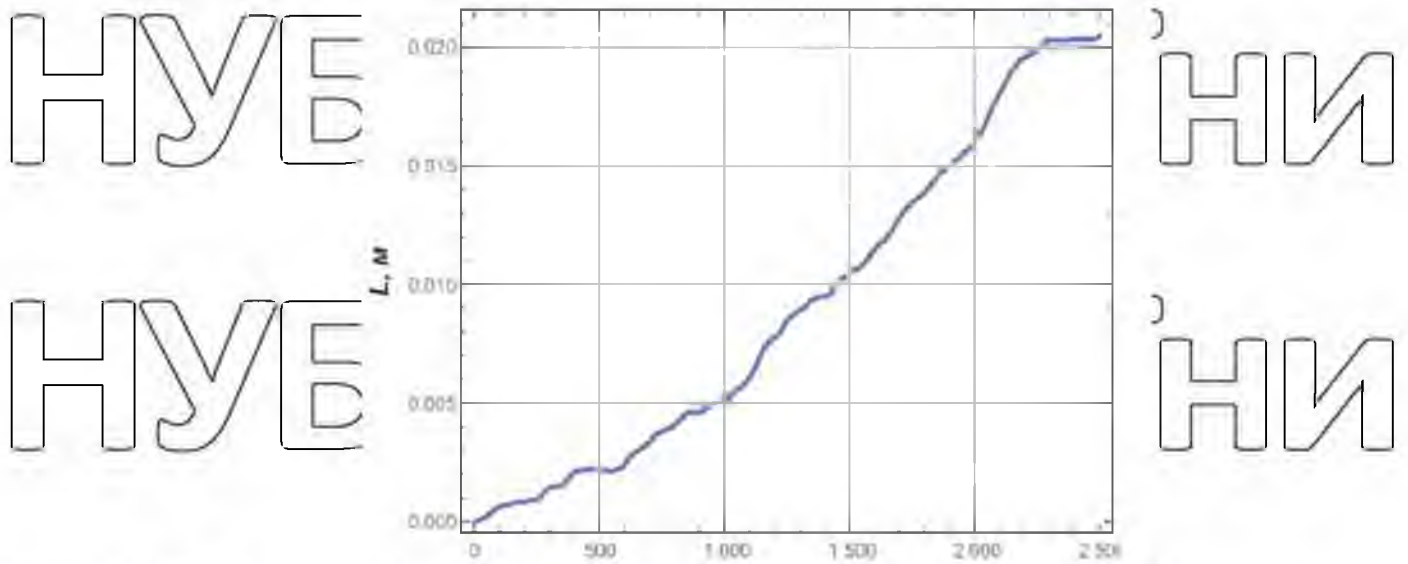


Рисунок 3.17 – Дистанція, пройдена датчиком в ході експерименту

Варто відзначити, що отриманий графік коректно відображає пройдену відстань 21 см, хоча початковий графік без фільтрації даних показував значення, які суттєво відрізнялися від цих показників. Аналогічні операції були проведені для осі «z», проте переміщення датчика відбувалося не по площині, а шляхом підняття його вгору. В результаті фільтрації було отримано графік, який демонструє висоту підняття датчика в ході експерименту. Це зображено на [рисунку 3.18](#).

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

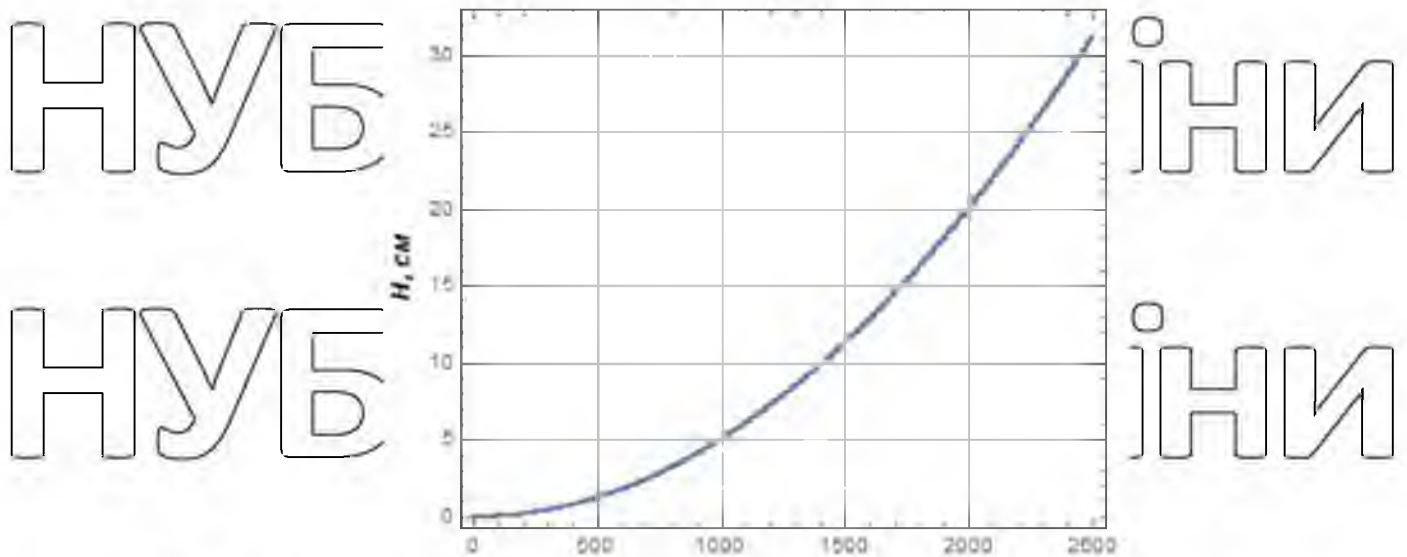


Рисунок 3.18 - Висота підняття датчика в ході експерименту

### Висновки до розділу 3:

1. Проведено детальний опис баштового крана та його технічних характеристик, що включають висоту підйому вантажу, висіт вантажу крана, вантажопідйомність, потужність двигуна, передавальні числа, номінальні швидкості та інші параметри. Це дало змогу глибше зрозуміти принципи роботи та особливості конструкції лабораторної установки баштового крана.
2. Описано програмне забезпечення для керування механізмами баштового крана, що дозволило ознайомитися з інтерфейсом користувача та функціями управління. Визначено, що використання програмного забезпечення спрощує процес керування краном, забезпечує більш точне та безпечне виконання операцій.
3. Вивчено принцип роботи та особливості застосування частотних перетворювачів у контексті управління лабораторною установкою баштового крана. Виявлено, що використання частотних перетворювачів

дає можливість точної регулювання лінійної швидкості руху візка та кутової швидкості повороту стріли баштового крана, що значно покращує точність та безпеку руху вантажу.

4. Було розглянуто процес підготовки датчиків для експерименту, який включав розібрання, калібрування та налаштування датчиків відповідно до вимог дослідження. Також було описано процес збору даних з використанням восьмиканального пристрою mDAQ і програмного забезпечення mDAQ14 Reader, які дозволили отримати точні дані про переміщення датчиків в режимі реального часу.

5. Після аналізу та обробки отриманих даних за допомогою програми Wolfram Mathematica, було створено графіки, що відображають пройдений датчиками відстань та висоту підняття в ході експерименту. Ці результати підтверджують адекватність роботи датчиків, а також їх налаштування та калібрування в рамках даного дослідження. Отримані результати є важливою частиною підготовки до проведення більш складних експериментів, а також можуть слугувати базою для подальших наукових досліджень та покращень системи збору даних.

## РОЗДІЛ 4

# ПЛАНУВАННЯ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ УСТАНОВКИ БАШТОВОГО КРАНУ

## 4.1. Процес встановлення та послідовність дій для проведення експерименту

Процедура підготовки до проведення експерименту, що базується на установці баштового крану в навчальній аудиторії 354, 11 корпусу, факультету Конструювання та дизайну НУБіП України, виконана наступні етапи:

1. Підключення частотних перетворювачів до мережі 380В із подальшим з'єднанням їх до персонального комп'ютера (ноутбука) за допомогою відповідних кабелів.

2. Підключення механізму повороту крану та механізму переміщення вгору до частотних перетворювачів.

3. Закріплення датчика положення на вантажі, який буде переміщуватися в ході експерименту.



Рисунок 4.1 – Датчик положення, закріплений на вантажі, який використовується для експерименту

4. Підключення датчика до персонального комп'ютера (ноутбука) та до мережі електропостачання, для чого було використано переносний блок живлення з встановленою напругою 10 В.



Рисунок 4.2 – Підключення датчика до системи електропостачання та до mDaq

5. Запуск програмного забезпечення, необхідного для проведення досліду, які були описані в розділі 3. Конкретно, це програми «Project1» та «mDaq-reader».



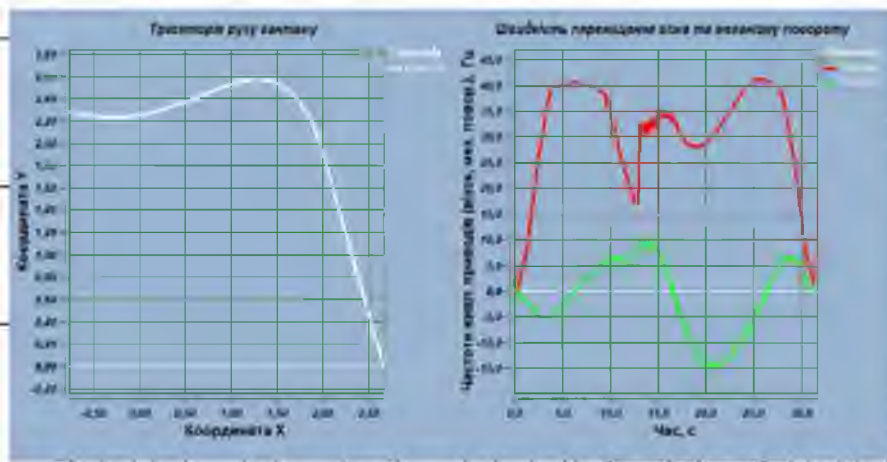


Рисунок 4.3 – Візуалізація траєкторії переміщення вантажу та швидкості

переміщення візка з механізмом повороту за допомогою програмного

забезпечення «Project1»

У ході проведення експерименту були виконані наступні дії:

1. Запис даних з датчика через програму "mDaq-reader" було започатковано за 1 секунду перед запуском частотних перетворювачів і продовжувалося протягом 5 секунд після завершення циклу переміщення вантажу.
2. Частотні перетворювачі були запущені відповідно до попередньо встановлених параметрів руху в програмі "Project1".
3. Після завершення експерименту, дані з датчика були збережені для подальшої обробки.
4. Останнім етапом була обробка отриманих даних, яка включала аналіз отриманих даних та їх візуалізацію.

Важливим елементом дослідження було використання відеофіксації. Експеримент був знятий на відео для подальшого детального аналізу та оцінки. Записане відео було завантажено на Google Диск [35] для забезпечення легкого доступу та можливості спільного використання матеріалів експерименту.

Таким чином, методично і послідовно було проведено експеримент з використанням установки баштового крану. Завдяки використанню сучасного

обладнання та комп'ютерного забезпечення, нам вдалося отримати точні і надійні дані. Процес збору даних було максимально автоматизовано, що знизило можливість появи помилок та забезпечило високу точність отриманих результатів.

#### Висновок до розділу 4:

1. У ході даного розділу було виконано підготовку, налаштування та проведення експерименту на баштовому крані в навчальній аудиторії.

2. Використання сучасних датчиків, частотних перетворювачів, та спеціалізованих програм для збору та обробки даних, дозволило ефективно реалізувати теоретичне дослідження, що було проведене у другому розділі, на практиці. Це не тільки забезпечило отримання даних з датчиків, але й надало можливість їх детального порівняння з даними, отриманими на теоретичному рівні.

3. Було перевірено достовірність теоретичних розрахунків та підтверджено їх відповідність реальним умовам експлуатації баштового крана.

4. Результати експерименту дали змогу прослідкувати основні характеристики руху вантажу, що є важливим для подальших розрахунків та проектування оптимальних параметрів роботи баштового крана.

## РОЗДІЛ 5

СТРУКТУРА СИСТЕМИ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ РУКОМ  
МЕХАНІЗМУ ПОВОРОТУ І ЗМІНИ ВІСЬЛОТУ ВАНТАЖУ  
БАШТОВОГО КРАНА ТА РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ

## ЕФЕКТИВНОСТІ

## 5.1 Структурна схема автоматизованої системи керування краном

Автоматизація систем керування кранами є важливим етапом розвитку технологій, що дозволяють підвищити ефективність та безпеку їх роботи. В даному питанні ми розглядаємо структурну схему автоматизованої системи керування краном, що включає мікроконтролер, GPS-датчик, частотні перетворювачі та інші компоненти.



Рисунок 5.1 – Схема автоматизованої системи керування краном з GPS-

датчиком та мікроконтролером для оптимізації траєкторії переміщення вантажу

Структурна схема автоматизованої системи керування краном відображає взаємодію між різними компонентами системи. Кранівник відправляє команди до мікроконтролера, який обробляє сигнали від GPS-датчика та інших датчиків. На основі цих даних мікроконтролер вираховує оптимальну траєкторію

переміщення гака та відправляє команди до частотних перетворювачів для керування механізмами переміщення візка та повороту крана.

Така система дозволяє покращити ефективність роботи крана, забезпечити точність переміщення вантажів, знизити ризик аварій та полегшити роботу кранівника.

## 5.2 Рекомендації щодо реалізації обходу перешкоди баштовим краном

Для успішної реалізації обходу перешкоди баштовим краном необхідно мати декілька ключових компонентів. По-перше, потрібно знати точку, де кран знаходиться в даний момент. По-друге, потрібно знати точку, куди потрібно перемістити вантаж. Однак, щоб ефективно уникати перешкод на будівельному майданчику, потрібна електронна карта майданчику. Ця карта має бути прив'язана до GPS-сигналу і відслідковувати точне переміщення крана. Використання GPS дозволяє крану уникати перешкод, рухаючись найефективнішим маршрутом. Така система дозволяє оптимізувати час роботи, зменшуючи ризик зіткнення з перешкодами на будівельному майданчику.

Для ефективною роботи баштового крану він повинен бути оснащений високоякісним частотним керованим приводом. Особливо рекомендується використовувати частотний перетворювач SINAMICS G120 від Siemens [36]. Цей перетворювач використовується для механізму повороту і механізму зміни вильоту вантажу. Він відрізняється високою надійністю, простотою встановлення та обслуговування, а також можливістю точного регулювання швидкості руху вантажу.

Основні характеристики SINAMICS G120:

- Діапазон потужності: від 0,37 кВт до 250 кВт.
- Напруга живлення: 380-480В, 3-фазна.
- Швидкість реакції: дуже висока, завдяки вбудованому процесору.

Сумісність: може бути використаний з різними типами двигунів, включаючи асинхронні та синхронні двигуни.

Безпека: має вбудовані функції безпеки, включаючи Safe Torque Off (STO) та Safe Stop 1 (SS1).

– Модульність: має модульну структуру, що дозволяє легко замінювати окремі компоненти.

– Енергоєфективність: висока, завдяки використанню технології енергозбереження.



Рисунок 5.2 – Частотний перетворювач SINAMICS G120

У сучасних багтових гранах важливим аспектом є забезпечення точності та стабільності переміщення вантажів. Один із способів вдосконалення цих показників полягає у використанні сенсорів, які дозволяють відстежувати положення та рух вантажів у просторі. Датчик MPU-6050 [37] є одним з таких сенсорів, що можуть використовуватися у багтових кранах.

MPU-6050 – це інтегрований 6-осевий датчик руху, який об'єднує 3-осевий гіроскоп та 3-осевий акселерометр.

Основні характеристики датчика MPU-6050:

- Тип датчика: 6-осевий датчик руху (3-осевий гіроскоп + 3-осевий акселерометр).

- Робоча напруга: 2.3 - 3.4V (типово 3.3V).

- Інтерфейс: I2C.

- Частота оновлення даних: від 4 Гц до 8 кГц.

- Діапазон вимірювань гіроскопа:  $\pm 250$ ,  $\pm 500$ ,  $\pm 1000$ , або  $\pm 2000$  °/сек.

- Діапазон вимірювань акселерометра:  $\pm 2g$ ,  $\pm 4g$ ,  $\pm 8g$ , або  $\pm 16g$ .

- Температурний діапазон: від -40 до  $\pm 85$  градусів за Цельсієм.

- Цифровий вихід через I2C-інтерфейс.

- Вбудований 16-бітний аналого-цифровий перетворювач для кожного каналу.

- Вбудований цифровий фільтр руху.



Рисунок 5.3 – 6-осевий датчик руху MPU-6050 з 3-осевим гіроскопом та 3-осевим акселерометром

Цей датчик широко використовується в різноманітних системах: відстеження руху та орієнтації, включаючи стабілізацію обладнання, робототехніку, спортивні та медичні пристрої. Він надає високу точність вимірювань з низьким рівнем шуму.

Для захисту датчика MPU-6050 від навколишнього середовища, можна використати наступні методи:

- Водонепроникна оболонка/корпус. Датчик може бути вміщений у водонепроникну оболонку або корпус, який захистить його від вологи та пилу.

- Захисна плівка: Для додаткового захисту від пилу та грязі можна використати спеціальну захисну плівку, яка не впливає на роботу датчика.

- Конформне покриття. Це спеціальний захисний шар, який наноситься на поверхню датчика. Воно захищає електронні компоненти від вологи, пилу, хімічних речовин та інших навколишніх впливів.

- Захист від вібрації та ударів: Для захисту від механічних впливів, датчик можна вмістити у спеціальний антивібраційний корпус або використати амортизатори для поглинання ударів та вібрації.

Варто враховувати, що вибір методу захисту залежить від конкретних умов роботи датчика та його технічних характеристик.

Одним із критичних вимог для успішної реалізації даної задачі є вибір мікроконтролера з певною обчислювальною здатністю, що дозволить розраховувати траєкторію об'єкта. В даному випадку, необхідно забезпечити обробку двох траєкторій: одна пряма лінія та друга - уточнена з поворотами і віднесенням до точки спряження. Мікроконтролер має здійснювати розрахунки швидкості за допомогою фільтра Савицького-Голєя, а також мати загальнопромислові можливості.

Однією з рекомендованих опцій для використання в даному проекті є мікроконтролер STM32F4 серії від компанії STMicroelectronics. Цей мікроконтролер має потужний 32-бітний ARM Cortex-M4 ядро з плаваючою комою, що забезпечує високу обчислювальну продуктивність. Крім того, мікроконтролер оснащений широким спектром периферійних інтерфейсів та модулів, таких як ADC, DAC, SPI, I2C, UART, таймери, DMA, PWM та інше, що

робить його відмінним рішенням для задач обробки сигналів та управління рухом.

Використання мікроконтролера STM32F4 серії забезпечить необхідну обчислювальну потужність для розрахунку траєкторій, обробки даних з датчиків, а також реалізації необхідних алгоритмів фільтрації, відстеження та керування рухом.

### 5.3 Розрахунок економічної ефективності баштового крана Liebherr 120

В сучасному світі економічна ефективність є одним з ключових факторів при оцінці різних технологій та систем. Особливо це стосується будівельної галузі, де важливо забезпечити максимальну продуктивність роботи при мінімальних витратах. Використання сучасних систем керування для баштових кранів може значно підвищити ефективність їх роботи, зменшити витрати на оренду та знизити ризики, пов'язані з людським фактором.

У даному питанні буде проведено дослідження розрахунку економічної ефективності використання автоматизованої системи керування для баштового крана Liebherr 120. Основна мета полягає в тому, щоб визначити різницю між часом переміщення вантажу при ручному та автоматизованому керуванні, збільшення продуктивності роботи крана та економічну ефективність від зменшення тривалості оренди.

Для досягнення поставленої мети буде використана методика розрахунку, яка передбачає порівняння характеристик роботи крана при використанні різних систем керування. Ця методика розрахунку описана у роботі [33]. Результати дослідження дозволять розуміти практичну значимість впровадження автоматизованих систем керування в області будівельних кранів та їх вплив на економічну ефективність будівельних проектів.



Розрахунок економічної ефективності починається з встановлення вихідних даних та характеристик баштового крана Liebherr 120. Визначимо ключові параметри, які впливають на продуктивність роботи крана, що в свою чергу дасть змогу порівняти його ефективність за різних умов та режимів роботи.

Таблиця характеристик баштового крана Liebherr 120, а також вихідних даних для розрахунку економічної ефективності наведено нижче.

Таблиця 3.1.

Основні характеристики баштового крана Liebherr 120

Характеристика	Значення
Максимальна вантажопідйомність	6-8 т
Вантажопідйомність при макс. вильоті стріли	1550 кг - 2200 кг
Максимальний виліт стріли	до 55 м - 60 м
Тип башти	120 НС (132 НС)
Висота під гаком	20-180 м
Вантажний мотор	31-45-61 кВ
Заснування	стаціонарний / анкер, рельсовий хід

Таблиця 3.2.

Вихідні дані для розрахунку економічної ефективності

Вхідні дані	Значення
Вартість оренди [38]	500 грн/год
T (робочий час машини за рік)	3680 год 16 год/день · 230 днів у році = 3680
Q (середня вантажопідйомність)	4,275 т $Q = (7 + 1,55) / 2 = 4,275$ т
Kд (коэф. використання за добу)	0,55
Kр (коэф. використання за рік)	0,65
Kв (коэф. використання за вантажопідйомністю)	0,63 $7 / 4,275 = 0,63$
T <sub>ручне</sub> (тривалість циклу при ручному керуванні)	3,3 хв
T <sub>автоматизоване</sub> (автомат. кер.)	3,38 хв

Економічний ефект від використання розробленої системи полягає у зменшенні експлуатаційних витрат. Він базується на скороченні тривалості циклу переміщення вантажу краном. Завдяки автоматизації процесу, кранівник не має потреби доводити переміщення вантажу з однієї точки до іншої в ручному режимі, що дозволяє заощадити час. Економія часу призводить до збільшення продуктивності роботи баштового крана Liebherr 120, а збільшення продуктивності, в свою чергу, веде до меншої тривалості оренди крану та до його економічної ефективності.

Річну продуктивність баштового крана Liebherr 120 можна визначити за формулою:

$$Q_p = \frac{60T}{T_c} \cdot K_d \cdot K_p \cdot K_v \quad (5.1)$$

Обраховуючи значення за формулою (5.1), зможемо визначити різницю продуктивностей кранів з ручним та автоматизованим керуванням:

$$\begin{aligned} \Delta Q &= 60T \cdot K_d \cdot K_p \cdot K_v \cdot (T_{ц,ручне}^{-1} - T_{ц,автоматизоване}^{-1}) = \\ &= 60 \cdot 3680 \cdot 4,275 \cdot 0,55 \cdot 0,65 \cdot 0,63 \cdot (3,5^{-1} - 3,38^{-1}) = 434,4 \text{ т/рік} \end{aligned} \quad (5.2)$$

Отже, різниця між продуктивністю роботи баштових кранів Liebherr 120 НС з ручною та автоматизованою системами керування становить 431,4 т/рік.

Годинна продуктивність баштового крана Liebherr 120 НС з ручною системою керування складає:

$$P_{\text{год}} = \frac{60}{T_{ц,ручне}} \cdot K_d \cdot K_p \cdot K_v \quad (5.3)$$

$$P_{\text{год}} = \frac{60}{3,5} \cdot 0,55 \cdot 0,65 \cdot 0,63 = 30,839 \text{ т/год}$$

Розділивши отримані значення, можна визначити тривалість зекономленого часу:

$$431,4 \cdot 30,839 = 13,99 \text{ год} \quad (5.4)$$

Орендна вартість баштового крана Liebherr 120 HC становить 500 грн/год. Таким чином, економічна ефективність, досягнута в результаті збільшення продуктивності роботи баштового крана Liebherr 120 HC з автоматизованою системою керування, складає:

$$13,99 \cdot 500 = 7190 \text{ грн/рік} \quad (5.5)$$

Припускаючи, що загальний термін експлуатації крана становить 25 років, відповідний економічний ефект дорівнює:

$$7190 \cdot 25 = 174875 \text{ грн} \quad (5.6)$$

### Висновки до розділу 5:

1. Була розглянута структурна схема автоматизованої системи керування краном, яка дозволяє оптимізувати роботу крана та забезпечити більш ефективне керування його рухами.
2. Розрахунок економічної ефективності баштового крана Liebherr 120 показав, що впровадження автоматизованої системи керування може привести до значного економічного ефекту від експлуатації крана. Зокрема, економія часу становила 13,99 годин на рік, що призвело до економії 7190 грн/рік. Враховуючи загальну тривалість експлуатації крана у 25 років, відповідний економічний ефект складає 174875 грн.
3. Отримані результати дослідження можуть бути використані для проектування та розробки нових систем керування баштовими кранами, забезпечуючи їх більш ефективну роботу та підвищуючи безпеку персоналу.

## ВИСНОВКИ

## НУБІП України

1. В першому розділі було проведено аналіз наукових та патентних документів, що стосуються планування траєкторій руху вантажу, який переміщується баштовим краном. Зростання кількості наукових публікацій та патентних заявок в цій галузі свідчить про її актуальність та потребу в подальшому дослідженні. Аналіз наукових робіт виявив ряд проблем, зокрема, з підвищенням точності та продуктивності роботи крану, що підтверджує необхідність розробки нових методів планування траєкторій руху.

## НУБІП України

2. У другому розділі була розроблена методика побудови та оптимізації траєкторій руху вантажу баштового крана. Методика включає в себе стадії побудови, дискретизації та уточнення траєкторії, що дозволяє забезпечити плавний рух вантажу, обхід перешкод, а також узгодженість руху механізмів повороту крана та переміщення візка. Результати розрахунків можуть бути використані для реалізації практичного керування механізмами крана за допомогою частотних перетворювачів. Розроблена методика має загальний характер і може бути застосована для побудови траєкторій руху вантажу різних конфігурацій.

## НУБІП України

3. У третьому розділі було детально описано технічні характеристики баштового крана і програмне забезпечення для його керування, а також принципи роботи і застосування частотних перетворювачів. Була проведена робота з датчиками, що включала калібрування, налаштування і збір даних. Аналіз отриманих даних підтвердив адекватність роботи датчиків та їх налаштувань, що є важливим етапом підготовки до проведення більш складних експериментів та може бути використано у майбутніх наукових дослідженнях.

## НУБІП України

## НУБІП України

## НУБІП України

4. У четвертому розділі було успішно проведено практичне тестування теоретичних розрахунків, виконаних у другому розділі, за допомогою реального експерименту на баштовому крані. Використання спеціальних приладів та інструментів забезпечило ефективну реалізацію дослідження, дозволило отримати дані та підтвердити достовірність теоретичних розрахунків. Отримані результати виявились важливими для подальших розрахунків та проектування оптимальних параметрів роботи баштового крана.

5. У п'ятому розділі було розглянуто структурну схему автоматизованої системи керування баштовим краном і оцінено її економічну ефективність. Результати розрахунків підтвердили, що впровадження такої системи може призвести до значного економічного ефекту, зокрема, до зменшення часу роботи крана та збільшення економії коштів. Отримані результати можуть бути використані для подальшого проектування та розробки ефективних систем керування баштовими кранами, що сприятиме підвищенню їх продуктивності та безпеки персоналу.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Scopus [Електронний ресурс]. – Режим доступу:  
<https://www.scopus.com/home.uri>
2. Web of Knowledge [Електронний ресурс]. – Режим доступу:  
<https://www.webofknowledge.com/>
3. Google Scholar [Електронний ресурс]. – Режим доступу:  
<https://scholar.google.com/>
4. Deutsches Patent- und Markenamt [Електронний ресурс]. – Режим доступу:  
<https://register.dpma.de/DPMAregister/pat/basis>
5. Bojan Andonovski, Li Jianqiang, Sherine Jeyaraj, Ang Zi Quan, Xia Yonggao, Ang Wei Tech; (2020). Towards a Development of Robotics Tower Crane System. 2020 16th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV), (), –. doi:10.1109/icarcv50220.2020.9305432
6. Wu, Keyi; Garcia de Soto, Borja; Zhang, Feilian (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
7. Mark Burkhardt; Oliver Sawodny; (2021). A graph-based path planning algorithm for the control of tower cranes. 2021 American Control Conference (ACC), (), –. doi:10.23919/acc50511.2021.9482797
8. Ouyang, Huimin; Tian, Zheng; Yu, Lili; Zhang, Guangming (2020). Motion Planning Approach for Payload Swing Reduction in Tower Cranes with Double-Pendulum Effect. Journal of the Franklin Institute, (), S0016003220300855–. doi:10.1016/j.jfranklin.2020.02.001
9. Chen, He; Fang, Yongchun; Sun, Ning (2019). An adaptive tracking control method with swing suppression for 4-DOF tower crane systems. Mechanical Systems and Signal Processing, 123(), 426–442. doi:10.1016/j.ymssp.2018.11.018

10. Liu, Zhuoqing; Yang, Tong; Sun, Ning; Fang, Yongchun (2019). An Antiswing Trajectory Planning Method with State Constraints for 4-DOF Tower Cranes: Design and Experiments. IEEE Access, ( ), 1–1. doi:10.1109/ACCESS.2019.2915999
11. Chen, He; Fang, Yongchun; Sun, Ning (2017). [IEEE 2017 Chinese Automation Congress (CAC) - Jinan (2017.10.20-2017.10.22)] 2017 Chinese Automation Congress (CAC) - A tower crane tracking control method with swing suppression. , ( ), 3609–3614. doi:10.1109/CAC.2017.8243407
12. Tubaileh, Allan (2016). Working time optimal planning of construction site served by a single tower crane. Journal of Mechanical Science and Technology, 30(6), 2793–2804. doi:10.1007/s12206-016-0346-8
13. Carbone, Giuseppe; Gomez-Bravo, Fernando (2015). [Mechanisms and Machine Science] Motion and Operation Planning of Robotic Systems Volume 29 || Path Planning and Trajectory Planning Algorithms: A General Overview. doi:10.1007/978-3-319-14705-5\_1
14. Wang, Liang; Wang, Kezhi; Pan, Cunhua; Xu, Wei; Aslam, Nauman; Hanzo, Lajos (2020). Multi-Agent Deep Reinforcement Learning Based Trajectory Planning for Multi-UAV Assisted Mobile Edge Computing. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, doi:10.1109/TCCN.2020.3027695
15. Chai, Runqi; Tsourdos, Antonios; Savvaris, Al; Chai, Senchun; Xia, Yuanqing; Chen, C. L. Philip (2019). Six-DOF Spacecraft Optimal Trajectory Planning and Real-Time Attitude Control: A Deep Neural Network-Based Approach. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, doi:10.1109/TNNLS.2019.2955400
16. Fang, Yi; Hu, Jie; Liu, Wenhai; Shao, Quanquan; Qi, Jin; Peng, Yinghong (2019). Smooth and time-optimal S-curve trajectory planning for automated

robots and machines. Mechanism and Machine Theory,  
doi:10.1016/j.mechmachtheory.2019.03.019

17. Chen, He; Fang, Yongchun; Sun, Ning (2016). Optimal trajectory planning and tracking control method for overhead cranes. IET Control Theory & Applications, doi:10.1049/iet-cta.2015.0809

18. Zhang, Xuebo; Fang, Yongchun; Sun, Ning (2014). Minimum-Time Trajectory Planning for Underactuated Overhead Crane Systems With State and Control Constraints. IEEE Transactions on Industrial Electronics, doi:10.1109/TIE.2014.2320231

19. Devesse, Wim; Ramteen, Marcus; Feng, Lei; Wikander, Jan (2013). [IEEE 2013 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE 2013) - Madison, WI, USA (2013.08.17-2013.08.20)] 2013 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE) - A real-time optimal control method for swing-free tower crane motions. , (), 336–341. doi:10.1109/CoASE.2013.6653933

20. Golafshani, A.R.; Aplevich, J.D. (1995). [IEEE International Conference on Control Applications - Albany, NY, USA (28-29 Sept. 1995)] Proceedings of International Conference on Control Applications - Computation of time-optimal trajectories for tower cranes. , (), 1134–1139. doi:10.1109/cica.1995.555920

21. Omar, H. M.; Nayfeh, A. H. (2003). Gain Scheduling Feedback Control for Tower Cranes. Journal of Vibration and Control, 9(3-4), 399–418. doi:10.1177/107754603030778

22. Barisa, Tin; Bartulovic, Mihovil; Zuzic, Goran; Iles, Sandor; Matusko, Jadranko; Kolonic, Fetah (2014). [IEEE 2014 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMCO) - Antalya (2014.9.21-2014.9.24)] 2014 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition - Nonlinear predictive control of a tower crane using



reference shaping approach. , 872–876.

doi:10.1109/EPEPEMC.2014.6980608

23. Roman, Raul-Cristian; Precup, Radu-Emil; Petriu, Emil M. (2020). Hybrid data-driven fuzzy active disturbance rejection control for tower crane systems.

European Journal of Control, (), S0947358020301667–.

doi:10.1016/j.ejcon.2020.08.001

24. Omar, Hanafy Mohammed. (2003). Control of gantry and tower cranes. Virginia Polytechnic Institute and State University, ProQuest Dissertations Publishing.

3073112.

25. Aboeser, Lohna T; El-Badawy, Ayman A (2020). Robust integral sliding mode control of tower cranes. Journal of Vibration and Control, (), 107754632093818–

doi:10.1177/1077546320938183

26. Rauscher, Florentin; Sawodny, Oliver (2020). Modeling and Control of Tower Cranes With Elastic Structure. IEEE Transactions on Control Systems

Technology, (), 1–16. doi:10.1109/TCST.2019.2961639

27. Gutierrez, I., Collado, J. (2015). [IEEE 2015 12th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE) -

Mexico City, Mexico (2015.10.28-2015.10.30)] 2015 12th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic

Control (CCE) - Obstacle avoidance in a two wired hammerhead tower crane.

28. He Chen, Peng Yang1, and Yanli Geng (2019). Proceedings of the 2019 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics

Hong Kong, China, July 8-12, 2019. A Time Optimal Trajectory Planning Method for Overhead Cranes with Obstacle Avoidance

29. Inomata, Akira, Noda, Yoshiyuki (2016). Fast trajectory planning by design of initial trajectory in overhead traveling crane with considering obstacle avoidance

and load vibration suppression. Journal of Physics: Conference Series, 744,

012070.

30. Matsusawa, Kanata; Noda, Yoshiyuki; Kaneshige, Akihiro (2019). [IEEE 2019 IEEE 15th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE) - Vancouver, BC, Canada (2019.8.22-2019.8.26)] 2019 IEEE 15th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE) - On-demand Trajectory Planning with Load Sway Suppression and Obstacles Avoidance in Automated Overhead Traveling Crane System

31. Корн, Р., Корн, Г. Довідник з математики для науковців та інженерів: визначення, теореми, формули / Р. Корн, Г. Корн. – М: Наука, 1968. – 720 с.

32. "Алгоритм Савицького-Голя" [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://ru.fswiki.wiki/wiki/Algorithme\\_de\\_Savitzky-Golay](https://ru.fswiki.wiki/wiki/Algorithme_de_Savitzky-Golay)

33. Муштин Д. Оптимізація режимів руху механізмів зміни вильоту вантажу та повороту баштового крана : дис. ... канд. наук з техн. наук : PhD : захищена 2021 / Муштин Дмитро Ігорович. – Київ, 2021. – 249 с.

34. Інструкція з експлуатації FR-E740 – методичні рекомендації до використання преобразователя частоти серії FR-E 700 / уклад. Mitsubishi Electric Europe B.V., FA - European Business Group. - Ratingen, Germany : Mitsubishi Electric, 2010. - 526 с.

35. Google Drive [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://drive.google.com/drive/folders/1zfy1lm8G1Ve1uwgbcJK5tAExn0v0PPX5u?usp=sharing>

35. Siemens. Стандартні перетворювачі частоти SINAMICS G120 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://new.siemens.com/ua/uk/produkt/technikolohiy-pryvodiv/sinamics-peretvoryuvachi-nyzkoyi-napruihy-sinamics/standartni-peretvoryuvachi-chastoty-sinamics/sinamics-g120.html>

НУБІП України

36. Arduino.ua. Акселерометр і гіроскоп MPU-6050, модуль 6DOF [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://arduino.ua/ru/prod512-akselerometr-i-giroskop-mpu-6050-modul-6dof>

37. Machineryline. Оренда баштових кранів LIEBHERR 120 HC [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://machineryline.ua/ru/-/arenda/bashennyekranu/liebherr-120-hc-511709/116590419331200>

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

ДОДАТКИ

# НУБІП України

Додаток А

Опублікована стаття у «Наукові доповіді НУБІП України» №2/102 (2023)

## НАУКОВІ ДОПОВІДІ НУБІП УКРАЇНИ



### ТЕХНІКА ТА ЕНЕРГЕТИКА АПК

Формування міжпорочневих з'єднань  
 Z. Sirko, V. Dyakonov, S. Okhrimenko, D. Torchilevsky, E. Starysh, V. Hrytsun

[http://dx.doi.org/10.31548/dopov:1d2\(102\).2023.017](http://dx.doi.org/10.31548/dopov:1d2(102).2023.017)

Сучасні тенденції системи контролю технічного стану гідроприладів сільськогосподарських машин  
 D. O. Lishchenko, P. T. Meliantsov

[http://dx.doi.org/10.31548/dopov:1d2\(102\).2023.018](http://dx.doi.org/10.31548/dopov:1d2(102).2023.018)

Змінення та відновлення геометричних параметрів перекордальних тит. методом плазмового нанесення зносостійких сплавів  
 Z. Sirko, M. Nosov, S. Okhrimenko, D. Torchilevsky, E. Starysh, V. Hrytsun

[http://dx.doi.org/10.31548/dopov:1d2\(102\).2023.019](http://dx.doi.org/10.31548/dopov:1d2(102).2023.019)

Побудова замкнутої ланки механізму зміни висоти вантажу з повороту баштового бара  
 Yu. O. Romashchuk, V. S. Lovachon, D. I. Velykopolivansky

[http://dx.doi.org/10.31548/dopov:1d2\(102\).2023.020](http://dx.doi.org/10.31548/dopov:1d2(102).2023.020)

ISSN: 2223-1609

# НУБІП України

# НУБІП України



Вісник студентів факультету конструювання та дизайну НУБіП України

**ЗМІСТ**

КІЛЬКІСНИЙ АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ МАЯТНИКОМ ФУРУТИ.....	3
THE LARGEST TOWER CRANE IN THE WORLD.....	5
АКТУАЛЬНІСТЬ ОЧИЩЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ДВИГУНА ВІД НАГАРОВОДКЛАДЕНЬ.....	6
ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ ТРИБОСПОЛУЧЕНЬ КОМПРЕСОРІВ АВТОМОБІЛІВ КАМАЗ.....	10
ВОДЕНЬ В СТАЛІ.....	15
ПРОГАРТОВАНІСТЬ ЛИВАРНИХ СТАЛЕЙ.....	17
ВИЗНАЧЕННЯ ТРИВАЛОСТІ РОЗГОНУ/ТАЛЬМУВАННЯ МЕХАНІЗМУ ПІДЙОМУ ВАНТАЖУ.....	18
КІЛЬКІСНИЙ АНАЛІЗ НАУКОВИХ ПРАЦЬ В ГАЛУЗІ ПЛАНУВАННЯ ТРАКТОРІЙ РУХУ ВАНТАЖУ, ЩО ПЕРЕМІЩУЄТЬСЯ БАШТОВИМ КРАНОМ.....	21
ДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ПРИВІДНОГО МЕХАНІЗМУ МОТОВИЛА ЖАТКИ ЗЕРНОЗБИРАЛЬНОГО КОМБАЙНА.....	23
ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ ПУСКУ ГВИНТОВОГО КОНВЕЄРА ДЛЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ ЗЕРНОВИХ МАТЕРІАЛІВ.....	25
ДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ МЕХАНІЗМУ ПІДЙОМУ ВАНТАЖУ КОЗЛОВОГО КРАНА.....	26
КІЛЬКІСНИЙ АНАЛІЗ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИХ ДОКУМЕНТІВ У ГАЛУЗІ РОЗРОБКИ СЕГВЕВ.....	28
ЗРАЗОК ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕТВОРЕНЬ В ВИЛИВКАХ.....	29
МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СТАЛІ.....	32
ОБГРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ РОБОЧИХ ОРГАНІВ РОТОРНОГО ГИЧКОРИЗУ ДЛЯ	

НУБІ

НУБІ

НУБІ

НУБІ

НУБІ

НУБІ

НУБІП Україна

*Вісник студентів факультету конструювання та дизайну НУБіП України*  
нульової швидкості до проміжної швидкості (половина від номінальної); в) розгін від посадочної швидкості до номінальної; г) гальмування від проміжної швидкості до посадочної

**Висновок.** Отримані графічні залежності необхідно реалізувати на практиці для того, щоб забезпечити мінімізацію динамічних зусиль у елементах механізму підйому вантажу.

УДК 621.61: 621.87

#### КІЛЬКІСНИЙ АНАЛІЗ НАУКОВИХ ПРАЦЬ В ГАЛУЗІ ПЛАНУВАННЯ ТРАЄКТОРІЇ РУХУ ВАНТАЖУ, ЩО ПЕРЕМІЩУЄТЬСЯ БАШТОВИМ КРАНОМ

Студент – Величко Ірина Д.І.

Науковий керівник – д.т.н., проф. Ромасевич Ю.О.

З огляду на постійне нарощування кількості об'єктів будівництва, споруд, будівель різних розмірів та габаритів, саме за допомогою баштових кранів здійснюються переміщення великогабаритних та важких вантажів. Але переміщення вантажу баштовим краном не виконується за лінійною траєкторією: інколи вантаж потрібно перемістити обминаючи деяку перешкоду. І саме тому перед дослідниками постає питання планування траєкторії руху вантажу, що переміщується баштовим краном. Нижче в таблиці 1 наведено кількісний аналіз наукових праць, які опубліковані за останні роки та проіндексовані у наукометричних базах даних Scopus [1], Web of Science [2] та Google Scholar [3], в яких дослідниками вивчається питання планування траєкторії руху вантажу, який переміщується за допомогою баштового крану.

- 21 -

*Вісник студентів факультету конструювання та дизайну НУБіП України*

Таблиця 1

Кількість наукових праць за період 2017-2022 рр.

Запит	Роки					Всього в базі	
	2022	2021	2020	2019	2018		2017
База Scopus							
tower crane AND trajectory planning	3	3	1	2		1	13
load trajectory planning	72	84	83	78	61	58	856
tower crane optimal control	5	3	3	3	1	1	39
tower crane obstacle avoidance	2	1	1				8
База Web of Science							
tower crane AND trajectory planning		4	1	2		1	11
load trajectory planning	75	109	97	95	70	66	875
tower crane optimal control	1	5	2	4		-	20
tower crane obstacle avoidance		1		1		-	3
База Google Scholar							
tower crane AND trajectory planning	698	1090	1090	1050	915	907	15600
load trajectory planning	15200	21700	19400	17700	16200	14700	286000
tower crane optimal control	1270	1680	1480	1380	1270	1220	21300
tower crane obstacle avoidance	363	537	538	517	452	544	12000

Було сформульовано пошукові запити, які найбільш близькі до тематики планування траєкторії руху вантажу переміщуванним баштовим краном. Серед них: tower crane AND trajectory planning, load trajectory planning, tower crane optimal control та tower crane obstacle avoidance. З таблиці 1 видно, що з плином часу питання планування траєкторії руху вантажу переміщуванним баштовим краном набирає все більшу популярність, все більше науковців намагаються

- 22 -

*Вісник студентів факультету конструювання та дизайну НУБіП України*

знайти способи покращення роботи баштового крану, змусити його переміщувати вантаж по певній траєкторії оминаючи різні перешкоди і зменшуючи при цьому тривалість його роботи.

**Висновок.** Таким чином, пошук оптимального рішення для обминання перешкод вантажу, що переміщується баштовим краном є актуальною науковою задачею, про що свідчить збільшення наукових публікацій за останні роки. Саме за допомогою правильно заданої траєкторії руху вантажу можна скоротити витрати часу на його переміщення і дозволить виконувати більший об'єм роботи баштового крану за менший проміжок часу, а також знизить ймовірність нещасних випадків, які можуть статися під час переміщення вантажу.

**Список використаних джерел:**

1. <https://www.scopus.com/home.uri>
2. <https://www.webknowledge.com/>
3. <https://scholar.google.com/>

УДК 621.87

#### **ДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ПРИВІДНОГО МЕХАНІЗМУ МОТОВИЛА ЖАТКИ ЗЕРНОЗБИРАЛЬНОГО КОМБАЙНА**

*Студент – Купців О.О.*

*Наукові керівники – д.т.н., проф. Ловейкін В.С., к.т.н. Ляшко А.П.*

Основною тенденцією сучасного комбайнобудування є підвищення продуктивності збирання зернових культур. Це досягається, в першу чергу, за рахунок підвищення продуктивності жатки, де необхідно збільшувати колову швидкість мотовила. В роботі розроблено привод мотовила, де в якості приводного двигуна використано гідравлічний двигун з регульованою

– 23 –

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

#### **ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ**

**«Вісник студентів факультету конструювання та дизайну  
Національного університету біоресурсів і природокористування  
України»**

**Випуск 10**

Відповідальний за випуск: д.т.н., проф., професор кафедри  
конструювання машин і обладнання Ромасевич Ю.О.

Дизайн і верстка – кафедра конструювання машин і обладнання  
НУБіП України.

Адреса редколегії – 03041, Україна, м. Київ, вул. Героїв оборони,  
126, НУБіП України.

Матеріали тез друкуються у авторській редакції.

Тираж виготовлено з оригінал-макету замовника.

Підписано до друку 15.11.2022. Формат 60x84 1/16.  
Ум. друк. арк. 9,69.

© НУБіП України. 2022

НУБіП

НУБіП

НУБіП

НУБіП

НУБіП

НУБіП

НУБіП України

ДІНИ

ДІНИ

ДІНИ

ДІНИ

ДІНИ

ДІНИ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І  
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ МЕХАНІКИ ТА АВТОМАТИКИ АПВ НААН  
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ



**ЗБІРНИК  
ТЕЗ ДОПОВІДЕЙ**

*X Міжнародної науково-технічної конференції з нагоди  
116-ї річниці від дня народження  
доктора технічних наук, професора,  
члена-кореспондента ВАСГНІЛ,  
віцепрезидента УАСГН  
КРАМАРОВА  
Володимира Савовича  
(1906-1987)*

**«КРАМАРОВСЬКІ ЧИТАННЯ»**

*23-24 лютого 2023 року  
м. Київ*

СТАЦІОНАРНИЙ ПОДРІБНЮВАЧ КАЧАНІВ КУКУРУДЗИ  
*Кузьченко В. Ф., Опущенко В. Б.*

УЗГОДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СХОВИЩ ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ  
ЗЕРНА З ЗОНОЮ ОБСЛУГОВУВАННЯ  
*Кудринський Р. Б., Дієсь В. І., Крулич С. О., Крулич О. М.*

**Секція 5 «Конструювання машин і обладнання»**

ВІДЦЕНТРОВИЙ РОЗПОДІЛЬНИК МАШИН ДЛЯ  
ВНУТРІШНЬОГРУНТОВОГО ЛОКАЛЬНОГО ВНЕСЕННЯ  
ТВЕРДИХ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРІВ  
*Опущенко В. Б., Опущенко Б. В., Ратушний В. В.*

ГНУЧКИЙ ШНЕКОВИЙ КОНВЕРСЕР НА ПРОТРУЮВАЧІ  
НАСІННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР  
*Опущенко В. Б., Опущенко Б. В., Барановський В. М.*

ОБГРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІ ПНЕВМАТИЧНОЇ ВИСІВНОЇ  
СИСТЕМИ МАШИН ДЛЯ ВНЕСЕННЯ ТВЕРДИХ  
МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРІВ  
*Опущенко В. Б., Опущенко Б. В., Адамчук О. В.*

ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ І РЕЖИМІВ РОБОТИ  
КОМБІНОВАНОГО ОЧИСНИКА ВОРОХУ ЦУКРОВИХ БУРЯКІВ  
МАШИН ДЛЯ ЗБИРАННЯ КОРЕНЕПЛОДІВ  
*Барановський В. М., Опущенко В. Б., Опущенко Б. В.*

ЯКІСНИЙ АНАЛІЗ НАУКОВИХ ПРАЦЬ В ГАЛУЗІ  
ПЛАНУВАННЯ ТРАЄКТОРІЙ РУХУ ВАНТАЖУ, ЩО  
ПЕРЕМІЩУЄТЬСЯ БАШТОВИМ КРАНОМ  
*Великоващенко Д. І., Романевич Ю. О.*

КОНСТРУКЦІЙНА СХЕМА РОБОЧОГО ОРГАНА  
КОРЕНЕЗБИРАЛЬНОЇ МАШИНИ  
*Ріхлівський П. А., Коповал О. О.*

ОБГРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ РОБОЧИХ  
СЕГМЕНТІВ МЕХАНІЗМУ НАГІЗАННЯ ЖИВЦІВ ДЕРЕВНИХ  
БІОЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР  
*Борис А. М., Ріхлівський П. А., Гузіс І. М.*



Коренеплоди, переміщуючись уздовж осей 6 обертання шнеків, за рахунок контакту з очисними пружними елементами 11 очисуються від налиплого на їх поверхні ґрунту за рахунок обертальних рухів приводного горизонтального вала 9 і шнеків. Частина домішок просіюється в зазор між шнеками, а інша непросіяна частина домішок, за рахунок розміщення очисних пружних елементів по гвинтовій лінії, напрямком навівання якої протилежний напрямку осевого переміщення коренеплодів, вивозиться гвинтовою навішкою приводного вала вздовж жолоба робочого русла за межі очисника. Очищені коренеплоди шнеками 3 подаються далі на наступні ТТС КМ.

Таким чином, за рахунок встановлення горизонтального вала 9 з очисними пружними елементами 11 відбувається інтенсифікація процесу відокремлення домішок від коренеплодів.

Використання в комбінованому очиснику ефекту пригальмування вороху над шнеками круглого перерізу, а також безперервне взаємно протилежне пересування коренеплодів і домішок над зазором між шнеками забезпечує інтенсивне відокремлення землі та рослинних домішок як при оптимальній, так і при надмірній або низькій вологості ґрунту.

#### Список використаних джерел

1. Аналіз тенденцій розвитку робочих органів для сепарації вороху коренеплодів / В.Ю. Рамін, В.М. Барановський, М.Р. Пацьків [та ін.] // Наукові нотатки. – Луцьк: ЛНТУ, 2011. – Вип. 31. – С. 298–305.
2. Барановський В. Основні етапи та загальні принципи сучасних тенденцій розвитку коренецербальних машин / Віктор Барановський // Вісник ГДТУ. – Тернопіль, 2006. – Т. 11, № 2. – С. 67–75.

УДК 621.873

#### ЯКІСНИЙ АНАЛІЗ НАУКОВИХ ПРАЦЬ В ГАЛУЗІ ПЛАНУВАННЯ ТРАКТОРІЙ РУХУ ВАНТАЖУ, ШО ПЕРЕМІЩУЄТЬСЯ БАШТОВИМ КРАНОМ

Д. І. ВЕЛНКОВАНЕНКО, студент,

Ю. О. РОМАСЕВИЧ проф., д.т.н.

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Головне призначення баштових кранів полягає в обслуговуванні будівельних майданчиків, їх також використовують в доках, при розвантаженні кораблів. Баштові крани зручні в використанні, їхня конструкція дозволяє оператору вчасно виконувати необхідні керуючі рухи, щоб переміщувати вантаж по заданій траєкторії. Перед дослідниками постає ж питання

217

планування траєкторії. Якісний аналіз можливостей крану, перешкод будівельного майданчика та, на цій основі, раціонально розроблена траєкторія руху вантажу дозволяє збільшити продуктивність баштового крану, а також зменшити ризики при його переміщенні.

Проведення якісного аналізу наукових публікацій дослідників за темою відбувалося за використанням пошукових баз Scopus, Web of Science та Google Scholar. Було задано пошуковий запит «tower crane obstacle avoidance» (уникнення перешкод баштовим краном).

Проведемо аналіз наукових публікацій по тематиці планування траєкторії руху вантажу, що переміщується баштовим краном. Даний якісний аналіз наукових праць дозволить зрозуміти якими способами дослідники намагаються реалізувати вимогу уникнення перешкод під час переміщення вантажу.

Дослідники І. Гутьєрес і Х. Колладо [1] провели дослідження з вивчення динаміки баштового крану, при уникненні зіткнень з перешкодою. Для цього вони використали додаткову відтяжку (каната). Це дозволяє зменшити кількість помилок при переміщенні вантажу, що позитивно вплинуло на уникнення перешкод.

Хе Чен, Пен Ян та Яньлі Ген у науковій публікації [2] для того, щоб досягнути можливості уникнення перешкод розробили траєкторії руху візка крана та траєкторію підйому/опускання вантажу. Дослідники розглядали плоску задачу. У результаті було запропоновано метод планування траєкторії для уникнення перешкод, який забезпечує швидке та точне позиціонування візка та усунення коливань вантажу.

Автори Акіра Іномата та Йошіюкі Нода опублікували наукову працю [3], в якій зробили акцент на методи планування траєкторії переміщення вантажопідійомного крана із двома ступенями вільності (модель мостового крана). Ними було запропоновано оптимізувати траєкторію руху вантажу виходячи із початкової можливої траєкторії. В результаті отримано рішення задачі, яке дозволяє зменшити витрати енергії та мінімізувати коливальну компоненту руху візка.

Каната Манусава, Йошіюкі Нода та Акіхіро Канешіге в публікації [4] запропонували метод планування траєкторії руху вантажу з використанням поетапної оптимізації з урахуванням уникнення перешкод і усунення маятникових коливань вантажу. Вони провели експериментальні дослідження отриманих результатів за допомогою лабораторної моделі мостового крана. Дані експериментів підтвердили можливість застосування методу на практиці.

З проведеного якісного аналізу вище стає зрозумілим той факт, що питання уникнення перешкод при використанні баштового крану та її інших модів кранів є актуальним. Його вирішенням в основному займаються науковці азійських країн, там де відбувається активні процеси забудови мегаполісів.

**Висновок.** Таким чином, провівши якісний аналіз наукових праць в галузі планування траєкторій руху вантажу, що переміщується баштовим краном, слід відзначити значну зацікавленість дослідників цим напрямком. Враховуючи той факт, що будівництво відбувається здебільшого у великих

318

містах, де щільність забудови досить значна, питання планування оптимальної траєкторії переміщення вантажу є невід'ємною складовою використання баштових кранів.

#### Список використаних джерел

1. Gutierrez, I.; Collado, J. (2015). [IEEE 2015 12th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE) - Mexico City, Mexico (2015.10.28-2015.10.30)] 2015 12th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE) - Obstacle avoidance in a two-wired hammerhead tower crane.
2. He Chen, Peng Yangl, and Yanli Geng (2019). Proceedings of the 2019 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Hong Kong, China, July 8-12, 2019. A Time Optimal Trajectory Planning Method for Overhead Cranes with Obstacle Avoidance.
3. Inomata, Akira; Noda, Yoshiyuki (2016). Fast trajectory planning by design of initial trajectory in overhead traveling crane with considering obstacle avoidance and load vibration suppression. Journal of Physics: Conference Series, 744, 012070.
4. Matsusawa, Kanata; Noda, Yoshiyuki; Kaneshige, Akihiro (2019). [IEEE 2019 IEEE 15th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE) - Vancouver, BC, Canada (2019.8.22-2019.8.26)] 2019 IEEE 15th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE) - On-demand Trajectory Planning with Load Sway Suppression and Obstacles Avoidance in Automated Overhead Traveling Crane System.

УДК 631.356.2

#### КОНСТРУКЦІЙНА СХЕМА РОБОЧОГО ОРГАНА КОРЕНЕЗБИРАЛЬНОЇ МАШИНИ

П. А. РИХТІВСЬКИЙ, к. т. н, старш. наук, співорб.,  
О. О. КОНОВАЛ, пров. інженер, здобувач

*Інститут механіки та автоматизації аграрно-мислислового виробництва НААН*  
E-mail: petro5081987@ukr.net; konovaloleg317@gmail.com

Створення української сільськогосподарської техніки сучасного технічного рівня – складний процес, що пов'язує послідовне використання проєктування, конструювання та виготовлення техніки, який вимагає на кожному етапі цілеспрямованих, взаємопов'язаних, всебічно обґрунтованих дій [1, 2].

В Україні роботи зі створення машин для збирання коренеплодів (морква, столовий буряк, редька та ін.) розпочаті в 1950 р. З того часу було створено ряд машин, таких як УКШ-1, ММТ-1, КПК-3, МУК-1,8 та ін. [3].

319

ІНФОРМАЦІЙНЕ ВИДАННЯ

ЗБІРНИК ТЕЗ ДОПОВІДЕЙ

X МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ  
КОНФЕРЕНЦІЇ

«КРАМАРОВСЬКІ ЧИТАННЯ»

з нагоди 116-ї річниці від дня народження

доктора технічних наук, професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ,  
віцепрезидента УАСГН

КРАМАРОВА Володимира Савовича

(1906-1987)

(23-24 лютого 2023 року)

Відповідальна за випуск: В. І. Мельник, доцент кафедри надійності техніки  
НУБіП України.

Дизайн і верстка: Ю. І. Ревенко.

Адреса редакційної колегії – 03041, Україна, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 16,  
НУБіП України, навч. корп. 5, кімн. 17.

Редакційна колегія не несе відповідальності за зміст представлених  
матеріалів, поданих в авторській редакції

Підписано до друку 7.04.2023. Формат 60x84 1/16  
Папір Maestro Print Гарнітура Times New Roman.  
Друк, арк. 18.1. Ум. друк.арк. 27.2. Наклад 100 прим.  
Тім. №  
Редакційно-видавничий відділ: НУБіП України  
03041, Київ, вул. Героїв оборони, 15. Т. 527-80-49, к 117

© НУБіП України, 2023

НУБіП

НУБіП

НУБіП

НУБіП

НУБіП

НУБіП

НУБіП України

їїни

їїни

їїни

їїни

їїни

їїни