

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертацію **Макарця Валерія Володимировича** на тему: «Оптимізація регулювання руху вантажопідйомних кранів прольотного типу», подану на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 13 «Механічна інженерія» за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування»

**Актуальність теми дослідження, її зв'язок із науковими програмами і планами.** Дисертація направлена на вирішення актуальної проблеми усунення коливань вантажу на гнучкому підвісі, які виникають через вітрові пориви та інші стохастичні фактори, а також впродовж перехідних режимів руху механізмів. Важливість вирішення даної проблеми пов'язана з тим, що ці коливання призводять до зайвих витрат часу на перевантаження, витрат електроенергії та зусиль кранівника. Також знижується продуктивність роботи крана і виникає небезпека для робітників. Очевидно, навіть досвідчені оператори кранів не можуть виконувати рух крану за оптимальними законами. Оптимізаційні підходи до регулювання руху крану дозволяють не лише усунути коливання вантажу, а й задовільнити інші вимоги щодо мінімізації небажаних явищ – надмірні витрати енергії, надмірна тривалість робочого циклу тощо. Застосування такого підходу забезпечує ефективність роботи кранів в широкому спектрі галузей – морські та річкові порти, машинобудування, металургія, сільське та лісове господарство, легка промисловість.

Робота виконана згідно з науково-дослідними та ініціативною тематиками кафедри конструювання машин і обладнання Національного університету біоресурсів і природокористування України, які мають номери державної реєстрації, що також свідчить про актуальність обраної тематики, глибоке вивчення проблеми та системність в пошуках шляхів її вирішення.

**Структура дисертації.** Робота містить анотацію, вступ, 6 розділів, висновки, перелік використаних літературних джерел та додатки у кількості 6 штук.

У **вступі** сформульовано сутність проблеми, вказано на актуальність теми дослідження, наведено дані про зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, сформовано мету та завдання дослідження, описані методи дослідження, визначено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, надано відомості про особистий внесок здобувача.

У **розділі 1** виконано аналіз стану вирішення задач оптимального керування рухом вантажопідйомними кранами. Проведено аналіз наукових робіт в галузях оптимізації роботи кранів, покращення динамічних критеріїв та критеріїв енергоефективності. Зроблено кількісну оцінку публікацій присвячених оптимізації руху кранів, які внесені до провідних науково-метричних баз. Наведено значні цифри, які переконливо свідчать про

надзвичайну актуальність обраної тематики та інтерес до вирішення цієї проблеми у всьому світі. Проведено кількісну оцінку винаходів, що зареєстровані в різних країнах по роках.

У **розділі 2** розроблено алгоритм налаштування ПІД-регулятора руху крана із вантажем на гнучкому підвісі. Завдання налаштування ПІД-регулятора розглядається з науково-прикладної точки зору і ґрунтується на розробці відповідних математичних моделей. На першому етапі розглядається динамічна модель системи «кран-вантаж». Розв'язок системи рівнянь отримано аналітичним шляхом у вигляді рівнянь швидкості, прискорення і ривка – швидкості зміни прискорення. Отримана математична модель ПІД-регулятора і визначені обмеження. Описано алгоритм розрахунку коефіцієнтів ПІД-регулятора для довільних значень маси вантажу та довжини підвісу і виконано приклад такого розрахунку. Представлена блок-схема алгоритму. В рамках аналізу динаміки руху системи «кран-вантаж» виконано розрахунок зміни в часі параметрів системи: швидкості крана, рушійного зусилля, споживаної потужності, побудовано фазовий портрет маятникових коливань вантажу під час розгону. Система координат для побудови фазового портрету прийнята за класичною схемою для даних досліджень – різниця координат крана і вантажу по горизонтальній вісі та різниця швидкостей крана і вантажу по вертикалі.

У **розділі 3** виконано синтез системи оптимального регулювання руху крана із вантажем на гнучкому підвісі. Метою оптимізації є покращення продуктивності та енергоефективності роботи крана. Оптимізація руху розпочинається з постановки задачі і визначення крайових умов для розгону, гальмування і робочого циклу механізму в цілому. Далі обираються критерії оптимізації, направлені на мінімізацію витрат енергії з урахуванням вимог до позиціонування і без них. Описані обмеження, що накладені на рух системи «кран-вантаж». Проведено дослідження стійкості руху системи «кран-вантаж». Представлено розв'язок задач оптимального керування без врахування позиціонування вантажу та з урахуванням. Досліджена динаміка руху системи «кран-вантаж» з використанням синтезованого регулятора руху і за умови дії стохастичних впливів під якими мається на увазі непередбачувані за напрямом і силою пориви вітру. Розрахунковим шляхом доведено, що запропоновані способи керування приводять систему «кран-вантаж» в заданий відповідно до кінцевих умов стан, система стійка до випадкових збуджень, що підтверджує вірність теоретичних міркувань і математичних викладок. Завершує розділ синтез нейрорегулятора для системи «кран-вантаж». Оптимізація відбувається за комплексним критерієм, в якому конкурують тривалість розгону і середньоквадратичне значення динамічної складової потужності приводу. Як впливає з наведеного моделювання динаміки руху, нейрорегулятор в сукупності з метаевристичним методом оптимізації ME-D-PSO, що використовується для його навчання, дає змогу отримати розв'язок задачі

оптимального керування, забезпечуючи плавну функцію зміни швидкості переміщення крану впродовж розгону та усунування коливань.

У **розділі 4** представлено планування експериментальних досліджень і методика обробки експериментальних даних. Наведено опис і технічні характеристики лабораторної установки, що побудована на основі талі, переміщуваної по двотавровій балці. Докладно розглядається приводне обладнання, його характеристики і керуючий мікроконтролер. Опис обладнання супроводжується фотографіями і скріншотом інтерфейсу програмного забезпечення для програмування мікроконтролера. Повний код керування частотним перетворювачем і збору експериментальних даних приведено в додатку Д. Планування експериментальних досліджень направлено на відтворення різних режимів руху, в тому числі і найневигідніших з точки зору фази коливання вантажу. Надано опис вимірювально-реєструючого обладнання і програмного забезпечення до нього. Проведено розрахунок коефіцієнтів регулятора руху візка з вантажем для експериментальних випробувань. Експериментальні дані реєструються на комп'ютері у вигляді масиву. Методика їх обробки описана в заключному підрозділі.

У **розділі 5** аналізуються експериментальні дані, визначаються причини їх відхилення від теоретичних. Розкрита мета проведення експериментів, показники похибок даних, виявлено розбіжності з теорією. Наведено приклад графіків зміни виміряних параметрів руху в часі з накладеними графіками що відображають їх відхилення від теорії. До таблиці зведено оціночні показники відхилення. Описано експеримент, що імітує випадкові впливи на вантаж, які в реальних умовах можуть виникати від поривів вітру.

У **розділі 6** розроблено рекомендацій щодо системи оптимального керування рухом крана прольотного типу та розраховано економічну ефективність від її впровадження. Рекомендації включають в себе опис способів оптимального керування за швидкістю і енергоефективністю. Розраховані графіки зміни потужності, зміни швидкості та зусилля як приклад підтвердження ефективності застосування запропонованого способу керування. Визначено область застосування запропонованих рішень – нові та модернізовані крани. Описано структурну схему системи оптимального керування рухом крану і блок схема алгоритму його функціонування. Даються рекомендації щодо апаратної реалізації системи. Описана методика розрахунку економічної ефективності впровадження оптимального керування і надається приклад розрахунку для кранів прольотного типу – мостового, напівкозлового і козлового.

**Список джерел** із 122 найменувань охоплює сучасні вітчизняні та закордонні публікації за темою дисертаційного дослідження.

**Висновки** до розділів узагальнюють викладений в них матеріал та містять кількісні показники отриманих результатів. Загальні підсумовують результати і свідчать про успішне виконання завдань дослідження.

**Додатки** містять підтверджуючі документи про впровадження результатів дисертації у виробництво і навчальний процес, код керуючої програми для частотного перетворювача, а також розрахункові і експериментальні дані, отримані в процесі виконання дослідження.

**Наукова новизна отриманих результатів** містить закономірності отримані вперше: синтезовано оптимальний регулятор системи „кран-вантаж” із сукупним обмеженням на: величину рушійного зусилля, швидкість його зміни в часі, обмеження за номінальною швидкістю руху крана та реверс його приводу; подальший розвиток підходів і методології розв’язання задач синтезу оптимального керування краном прольотного типу з вантажем на гнучкому підвісі у формі зворотного зв’язку в частині зведення її до задачі безумовної оптимізації і синтезу нейрорегулятора руху із вантажем на гнучкому підвісі для нелінійних задач оптимального керування.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в розв’язанні задач синтезу оптимального регулятора системи „кран-вантаж” із комплексом обмежень, які дали змогу врахувати технічні особливості елементів системи керування рухом крана (частотний перетворювач, мікроконтролер, датчики тощо), та пов’язані із практикою реалізації оптимального керування, що раніше не було реалізоване і запропоноване вперше.

Вперше розроблена інженерна методика налаштування ПД-регуляторів руху вантажопідйомним краном із вантажем на гнучкому підвісі, яка дозволяє оперативно змінювати налаштування коефіцієнтів регулятора в залежності від маси вантажу та довжини гнучкого підвісу.

Технічні рішення захищені патентом і впроваджені у виробництво та навчальний процес, що підтверджується відповідними актами.

**Значимість отриманих результатів для науки і практичного використання** полягає в тому, що на підставі виконаних досліджень вирішено актуальне науково-практичне завдання покращення експлуатаційних показників вантажопідйомних кранів прольотного типу шляхом оптимізації режимів їх руху за комплексним критерієм скорочення тривалості робочого циклу і енергоефективності, розроблені відповідні математичні моделі, методологія синтезу законів руху і система керування з нейрорегулятором для реалізації цих законів на реальному крані.

**Ступінь обґрунтованості наукових результатів, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації** забезпечується застосуванням апробованих методів теоретичної механіки, теорії машин і механізмів, теорії оптимального керування, планування експерименту. Достовірність експериментальних досліджень забезпечується використанням сучасних

комп'ютерних технологій і стандартним обладнанням, що виробляється в промислових умовах. Планування експерименту здійснено таким чином, щоб реалізувати найбільш не вигідні умови з точки зору фази коливань вантажу. Проведено співставлення теоретичних і експериментальних даних.

**Повнота викладу в опублікованих працях наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації** відповідає вимогам МОН України. Основні положення та висновки дисертаційних досліджень відображено в 18 наукових публікаціях, серед яких: 1 монографія у співавторстві, 1 науково-методичні рекомендації для підприємств України з проектування та експлуатації пристроїв автоматичного регулювання, 7 статей в наукових фахових виданнях категорії „Б”, 2 статі англійською мовою у періодичних виданнях, що проіндексовані у наукометричних базах даних Scopus/WoS, 7 тез доповідей на наукових конференціях та 1 патент України на корисну модель.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати досліджень доповідалися та обговорювалися на 7 Всеукраїнських і Міжнародних науково-технічних конференціях, в період з 2020 по 2023 роки.

**Рівень виконання поставленого наукового завдання та володіння здобувачем методологією наукової діяльності.** Дисертаційна робота показує високий рівень кваліфікації здобувача як виконавця наукового дослідження, має всі необхідні елементи та етапи проведення науково-дослідної роботи.

В дисертації проведено якісний літературний огляд та аналіз сучасних публікацій. Для розробки математичних моделей використано як класичні методи, так і найновітніші методи оптимізації і синтезу автоматичних регуляторів. Експериментальні дослідження базуються на сучасних зразках техніки і контрольно-виміральної апаратури. На всіх етапах широко використовуються засоби програмування і технічних розрахунків.

**Оформлення дисертації.** Дисертація оформлена згідно з нормативними вимогами і стандартами з дотриманням системного викладення матеріалу. Робота написана державною мовою, стиль викладення матеріалу – науковий, літературний. Текст дисертації переважно позбавлений граматичних та орфографічних помилок, а також технічних недоліків. Основні положення, висновки, пропозиції та рекомендації дисертації в цілому характеризуються послідовністю, аргументованістю і завершеністю.

#### **Зауваження до дисертації:**

##### *Зауваження до розділу 1:*

1. Кількісна оцінка публікацій, що присвячені тематиці оптимального керування кранами виокремлює найбільш висвітлювані теми за відповідними ключовими словами. Проте не надаються пояснення, чи можуть одні й ті самі статті бути враховані двічі або тричі входячи одразу в

кілька різних накометричних баз (наприклад Scopus та WoS), або знаходитись в пошуку при введенні різних запитів.

2. Кількість публікацій за кожним роком приведена в таблицях 1.1 – 1.3 дає змогу відстежити динаміку публікацій за роками. Але сама форма представлення даних не є зручною, з точки зору наочності та співставлення тенденцій у різних рядках. Було б доцільніше подати ті самі дані у вигляді графіків.
3. Форма графіків також була б доцільна і для кількісної оцінки патентів за роками виданих в різних країнах (табл. 1.4). Крім цього в патентному огляді не зазначено, на які винаходи автор дисертації спирався, визначаючи сучасний рівень технічних досягнень або розглядаючи винахід як прототип.

*Зауваження до розділу 2*

4. Алгоритм визначення коефіцієнтів ПД регулятора для довільних значень маси вантажу і довжини підвісу ґрунтується на застосуванні попередньо розрахованих значеннях цих налаштувань у заздалегідь визначених точках. Було б доцільно зауважити, яким чином проводити розрахунок, якщо крім цих двох параметрів додається зміни інших параметрів системи «кран вантаж», зображеної на рис. 2.1, наприклад, рушійне зусилля або сила статичного опору переміщення.
5. Назва підрозділу 2.3 потребує уточнення виразу «динаміка регулювання руху», можливо, малось на увазі динаміка регульованого руху?
6. З фазового портрету рис. 2.3 не видно, який шлях пройшов візок крану в першому і другому варіанті. Так само це не показано і на подальших рисунках. Рисунки 2.4, 2.5 і 2.6 було б бажано об'єднати в один для спрощення співставлення розрахованих параметрів – потужності, швидкості і рушійного зусилля.
7. Графіки на рис. 2.4 бажано було б доповнити інтегральною кривою, що описувала б зміну середнього зусилля за час розгону.
8. В коментарях до рис. 2.6 було б доцільно додатково зазначити, чи враховується ККД механізму і приводу. Пікове значення миттєвої потужності в режимі рекуперації (генератор) має більше значення ніж максимальне значення миттєвої потужності споживаної в двигунному режимі, що на практиці досягти дуже складно.

*Зауваження до розділу 3:*

9. Потребує роз'яснення останнє речення з першого абзацу розділу 3, з якого випливає, що оптимальні значення коефіцієнтів оптимального регулятора підвищить керованість механізму переміщення крана. Яким чином покращується саме керованість, що малось на увазі під цим висловом?
10. При визначенні критерію оптимізації вводиться величина « $P$  – потужність двигуна приводу крана». Необхідно надати додаткові роз'яснення, яка

потужність мається на увазі: така, що споживається двигуном в кожному окрему мить часу, встановлена потужність електродвигуна чи щось інше.

11. Незрозуміле перше речення другого абзацу підрозділу 3.2.2.. Можливо, малось на увазі слово «діють» замість «дають». В тому ж абзаці йде мова про привід крану, але зазначається, що штриховими кривими на графіку рис. 3.3 позначається зусилля, що діє на візок. Можливо, замість «візок» також малось на увазі «кран».
12. На рис. 3.3. і 3.5 представлені графіки зміни в часі багатьох динамічних характеристик руху системи «кран – вантаж». В тексті є опис кожної кривої, але для зручності читання і аналізу було б бажано дати позначення кривих також прямо під рисунком.
13. Для випадку врахування позиціонування вантажу бажано було б також навести графік зміни динамічних характеристик руху в часі, аналогічний до графіку на рис. 3.3..
14. Оціночні показники оптимального руху крану, які наводяться після кожного моделювання динаміки руху з тими чи іншими умовами доцільніше було б звести до єдиної таблиці, що було б наочніше і в той же час дало б змогу уникнути різних назв одних й тих самих параметрів, наприклад, в табл. 3.3 і 3.5 параметр називається «амплітуда коливань вантажу», в той же час в табл. 3.4 аналогічний параметр називається «відхилення вантажу від вертикалі». Також до оціночних показників було б доцільно додати такі: тривалість розгону і пройдений шлях.

*Зауваження до розділу 4:*

15. Друкарська помилка: перший підрозділ повинен мати нумерацію 4.1 замість 5.1, як в тексті.
16. Рис. 4.12 називається «Графіки фазових координат руху системи...» хоча по факту зображена зміна параметрів системи в часі.

*Зауваження до розділу 6:*

17. При розрахунку економічної ефективності фактично враховується лише підвищення продуктивності крану внаслідок застосування системи оптимального керування. При цьому підвищення енергоефективності і покращення динаміки, що несе додатковий економічний ефект, не враховується. Таким чином, ефект від впровадження запропонованого керування і системи, яка його реалізує фактично буде більшим.
18. Не до кінця зрозумілим є показник «Вартість оренди крана» з таблиці 6.1, оскільки зазначені типи кранів встановлюють майже завжди стаціонарно і є власністю організації, яка їх експлуатує.

Зазначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертації, переважно мають характер рекомендацій для покращення сприйняття викладеного матеріалу і оформлення. В цілому дисертація переконує, що Макарець Валерій Володимирович сформував бачення

об'єктивної картини стану досягнень в галузі оптимального керування кранами, повною мірою оволодів сучасними методами досліджень і роботи з лабораторним обладнанням, вимірювально-ресструючими приладами і програмним забезпеченням та іншими технічними засобами. Макарець Валерій Володимирович проявив вміння формулювати науково-практичне завдання і користуючись сучасною методологією вирішувати його.

### Висновок

Дисертація Макареця Валерія Володимировича «Оптимізація регулювання руху вантажопідйомних кранів прольотного типу» за актуальністю, ступенем новизни представлених результатів, їх наукової обґрунтованості, повноти викладення в опублікованих наукових працях, рівнем виконання поставленого наукового завдання та володінням методологією наукової діяльності відповідає вимогам, які ставляться до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії.

Дисертація відповідає галузі знань 13 «Механічна інженерія» за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування», а також вимогам наказу Міністерства освіти і науки України № 40 від 12 січня 2017 року «Про затвердження вимог до оформлення дисертації», Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 44 від 12 січня 2022 року, а її автор – Макарець Валерій Володимирович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії з галузі знань 13 «Механічна інженерія» за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування».

### Офіційний опонент

доцент кафедри «Підйомно-транспортні машини і обладнання» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»,

кандидат технічних наук, доцент

Всеволод СТРИЖАК

Підпис доц. Всеволода Стрижак  
ЗАСВІДЧУЮ:  
ВЧЕНИЙ СЕКРЕТАР  
НАЦІОНАЛЬНОГО-ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"  
"13" 11 2023

