

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

**КАДИКАЛО ІВАН ОЛЕКСАНДРОВИЧ**

УДК 621.873

**ОПТИМІЗАЦІЯ ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМІВ РУХУ  
МЕХАНІЗМУ ПОВОРОТУ СТІЛОВОГО КРАНА**

05.05.05 «Піднімально-транспортні машини»

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису

Робота виконана у Національному університеті біоресурсів і природокористування України Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник** доктор технічних наук, професор  
**Ловейкін Вячеслав Сергійович**,  
Національний університет біоресурсів  
і природокористування України,  
завідувач кафедри конструювання машин  
і обладнання

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Фідровська Наталія Миколаївна**,  
Харківський національний  
автомобільно-дорожній університет,  
професор кафедри будівельних  
і дорожніх машин

кандидат технічних наук, доцент  
**Міщук Дмитро Олександрович**,  
Київський національний університет  
будівництва і архітектури,  
доцент кафедри будівельних машин

Захист відбудеться «26» квітня 2021 року о 10<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.004.06 у Національному університеті біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 15, навчальний корпус № 3, кімната 301

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Національного університету біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 13, навчальний корпус № 4, кімната 41а

Автореферат розіслано «25» березня 2021 року

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

І. Л. Роговський

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Стрілові крани відносяться до вантажопідійомних машин, які мають підвищену небезпеку під час виконання вантажних операцій. Вони набули широкого використання в різних галузях виробництва: будівництві, металургії, машинобудуванні, сільському господарстві, хімічній промисловості, енергетиці тощо. Ці машини виконують підйом та переміщення різних типів вантажів. Стрілові крани можуть розвантажувати та завантажувати транспортні засоби, піднімати та опускати вантажі, повертати їх за допомогою механізму повороту та здійснювати інші операції. В результаті чого полегшуються умови праці та підвищується продуктивність виконання вантажних та монтажних операцій.

Відомо, що при обертанні стріли та переміщенні вантажу в елементах привода механізму повороту, а також і в несучій конструкції протікають небажані процеси, які спричиняють виникнення динамічних навантажень. Проблема зменшення динамічних навантажень у приводі та металоконструкції крана зумовлена зростанням швидкостей робочих рухів і є актуальною сьогодні. Суть цієї проблеми полягає в зменшенні впливів, які заважають нормальній експлуатації кранів, зумовлених динамічними перевантаженнями конструкції або її руйнуванням від «втоми» матеріалу. Слід відзначити, що найбільші динамічні навантаження виникають в процесах пуску та гальмування механізму повороту стрілового крана. Вони приводять систему до циклічних перевантажень та пошкоджень елементів привода та конструкції. Також на зростання динамічних навантажень в елементах конструкції впливає коливання вантажу на гнучкому підвісі при роботі механізму повороту (ускладнюють прицільне наведення захватного пристрою на вантаж і позиціонування вантажу на вказане місце). Таким чином, зменшується продуктивність роботи крана, його надійність і, як наслідок, підвищується можливість виникнення під час його роботи аварійних ситуацій.

Враховуючи, що велика кількість кранів сьогодні експлуатується, а стріловий кран є найважливішим вантажопідійомним пристроєм на будівельному об'єкті будь-якого призначення, тому розв'язання оптимізаційної задачі в напрямі зниження динамічних навантажень та усунення коливань вантажу під час роботи механізму повороту стрілового крана є досить актуальним завданням, адже це дозволить не лише підвищити продуктивність та надійність роботи стрілових кранів, а й збільшити строк їхньої експлуатації.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Роботу виконано згідно з науково-дослідними тематиками кафедри конструювання машин і обладнання Національного університету біоресурсів і природокористування України: «Наукове обґрунтування і розробка методів динамічного моделювання та режимно-параметричної оптимізації сучасних вантажопідійомних машин» (номер державної реєстрації 0119U100848) та «Динамічна оптимізація вантажопідійомних та транспортуючих машин в агропромисловому виробництві» (номер державної реєстрації 0118U004170).

**Мета та завдання дослідження.** Мета дисертації – підвищення ефективності роботи стрілових кранів за рахунок оптимізації перехідних режимів руху механізму повороту.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі завдання:

- проаналізувати результати досліджень стрілових кранів у напрямі зниження динамічних навантажень та усунення коливань вантажу на гнучкому підвісі;
- провести динамічний аналіз реальних режимів руху механізму повороту стрілового крана;
- оптимізувати процес пуску механізму повороту стрілового крана;
- побудувати фізичну модель стрілового крана та експериментально в лабораторних умовах дослідити режими руху механізму повороту стріли крана під час перехідних процесів;
- розробити методику проведення експериментальних досліджень для підтвердження результатів теоретичних досліджень;
- розробити рекомендації щодо створення системи керування приводом механізму повороту стрілового крана і визначити її ефективність.

*Об'єкт дослідження* – процес повороту стрілового крана.

*Предмет дослідження* – закономірності руху механізму повороту стрілового крана, які мінімізують динамічні навантаження та коливання вантажу на гнучкому підвісі.

**Методи дослідження.** Теоретичні дослідження проводилися з використанням наступних методів: теоретичної та аналітичної механіки, теорії механізмів і машин, варіаційного, диференціального та інтегрального числення, математичного моделювання, теорії автоматичного керування, модифікованого метаевристичного методу рою часточок ME-PSO. Для теоретичних розрахунків використано програмний продукт «Wolfram Mathematica v.11». При фізичному моделюванні застосовано теорію подібності технічних об'єктів.

Керування рухом механізму повороту крана відбувалося за створеною комп'ютерною програмою за допомоги компілятора «Borland Delphi v 6.0», а збір даних було проведено шляхом використання m-DAQ 14.

Експериментальні дослідження проводилися у лабораторних умовах на спроектованій і виготовленій моделі стрілового крана, яка знаходиться в лабораторії динаміки машин кафедри конструювання машин і обладнання Національного університету біоресурсів і природокористування України із застосуванням запроєктованого вимірювального обладнання.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Побудовано математичну модель динаміки руху механізму повороту, на основі якої вперше проаналізовано динамічні характеристики стрілової системи при повороті крана, що дало можливість встановити перспективні напрями удосконалення механізму повороту.

Оптимізовано режими повороту стрілового крана за одиничними інтегральними критеріями, які зменшують динамічні навантаження та коливання вантажу на гнучкому підвісі.

Розроблено безрозмірний комплексний інтегральний динамічний критерій для оцінки режиму повороту стрілового крана, який включає дію динамічних навантажень і швидкість їхньої зміни в часі, що дало можливість провести більш повну оптимізацію режиму руху механізму повороту крана.

Виявлено закономірності зміни рушійного моменту приводу механізму повороту стрілового крана в процесі пуску, які до мінімуму зводять дію динамічних навантажень.

Обґрунтовано та експериментально підтверджено використання оптимальних режимів руху для керування приводу механізму повороту стрілового крана.

**Практичне значення одержаних результатів.** Розроблено методику оптимізації режиму руху механізму повороту стрілового крана під час перехідних процесів.

Розроблено конструкцію приводного механізму, що дозволяє реалізувати оптимальні режими руху механізму повороту стрілового крана.

Оптимальне керування рухом механізму повороту здійснюється за допомогою розробленої комп'ютерної програми «optimal control of the jib crane turning mechanism».

Результати досліджень використано в навчальному процесі при вивченні дисциплін «Підйомно-транспортні машини» під час проведення лабораторних робіт та «Динаміка і оптимізація машин» при розробленні лекційного курсу для магістрів дослідників зі спеціальності «Галузеве машинобудування».

**Особистий внесок здобувача.** Основні теоретичні та експериментальні дослідження за темою дисертації, що виконувалася здобувачем особисто, зокрема: проаналізовано зміст публікацій з обраної теми, проведено аналіз конструкцій механізму повороту баштових/стрілових кранів, проаналізовано режими роботи механізму повороту крана, вивчено методи керування приводом, визначено проблеми та цілі дослідження; проведено обґрунтування концепції динамічного аналізу механізмів повороту кранів з вантажем на гнучкому підвісі; проведено динамічний аналіз механізму повороту стрілового крана; вибрано метод оптимізації та визначено оптимальні режими руху механізму повороту стрілового крана, обґрунтовано крайові умови руху в задачі оптимізації режиму повороту стрілового крана; проведено оптимізацію режиму повороту стрілового крана за комплексним інтегральним критерієм; розроблено фізичну модель механізму повороту стрілового крана, на якій проводилися експериментальні дослідження режимів руху при ручному (не керованому) та оптимальному керуванні під час роботи механізму повороту стрілового крана, вибрано вимірювально реєструюче обладнання.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертації отримали позитивну оцінку на: міжнародних наукових конференціях «Сучасні проблеми землеробської механіки» (м. Київ, 2015–2016 рр.); I Міжнародній науково-практичній конференції «Інженерія систем природокористування» (м. Київ, 2015 р.); міжнародних науково-практичних конференціях «Обуховські читання» (м. Київ, 2016, 2019, 2020 рр.); Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні технології виробництва зернових культур 2016» (м. Київ,

2016 р.); II Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні технології аграрного виробництва» (м. Київ, 2016 р.); міжнародних науково-технічних конференціях «Крамаровські читання» (м. Київ, 2017–2020 рр.); міжнародних конференціях науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів «Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування: конструювання та дизайн» (м. Київ, 2017–2020 рр.); IV Міжнародній конференції молодих вчених «Актуальні проблеми наук про життя та природокористування» (м. Київ, 2018 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Цілі сталого розвитку третього тисячоліття: виклики для університетів наук про життя» (м. Київ, 2018 р.); XIX Міжнародній науковій конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» (м. Київ, 2018 р.); XX Міжнародній науковій конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» (м. Київ, 2019 р.); II Міжнародній науково-практичній конференції «Агроінженерія: сучасні проблеми та перспективи розвитку» (м. Київ, 2019 р.).

**Публікації.** Основні результати дисертаційних досліджень опубліковано у 32 наукових працях, з яких монографія, 7 статей у наукових фахових виданнях України, включених до міжнародних наукометричних баз даних, стаття у науковому виданні України, включеному до міжнародних наукометричних баз даних, 2 статті у наукових виданнях іншої держави, 2 патенти України на корисні моделі та 19 тез наукових доповідей.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з анотацій, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи складає 235 сторінок. Список використаних джерел налічує 190 найменувань. Дисертація містить 94 ілюстрації та 17 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі «**Стан питання дослідження механізму повороту стрілового крана**» розглянуто основні види вантажопідйомних машин – кранів, їх призначення, класифікація, будова, принцип та режими роботи, опис механізму повороту стрілових кранів, їх види, основні елементи, особливості механізму повороту, принцип роботи, призначення, класифікація, будова, режими роботи. Проведено аналіз теоретичних досліджень динаміки та оптимізації руху механізму повороту стрілового крана з підвішеним вантажем на гнучкому підвісі та встановлено, що для мінімізації динамічних навантажень в системі використовують штучні режими руху приводу. Для отримання цих режимів руху використовують методи оптимізації (варіаційне числення, динамічне програмування, принцип максимуму Понтрягіна та ін.).

Дослідженням динаміки руху кранів, механізму повороту, зокрема, присвячено роботи таких авторів: С. А. Казака, А. Н. Орлова, Р. П. Герасимяка, А. А. Вайнсона, М. М. Гохберга, М. С. Комарова, Б. С. Ковальського, М. П. Александрова, О. В. Григорова, Ю. Гетцлінгера, С. Джонсона, Д. П. Волкова, Л. Я. Будікова, В. Ф. Гайдамаки, С. Л. Іванова, В. В. Кузьміна, В. В. Суглобова, Л. Н. Полякова, В. С. Ловейкіна, Н. А. Лобова,

О. Б. Неженцева, Н. М. Фідровської, Ф. Палиса, С. В. Ракші, Ю. О. Ромасевича, Ю. В. Човнюка, Д. О. Міщука, Fang Yihai, Tomasz Haniszewski Damian Gaska, Cho Yong K, F. Ju, Y. S. Choo, L. Wei, W. Yang та ін.

Задачі оптимізації режимів руху механізмів стрілових кранів та механізму повороту розглянуто у роботах В. Ф. Гайдамаки, Р. П. Герасимья, Я. Л. Геронімуса, Л. Д. Черноуська, М. М. Перельмутера, Ю. И. Акуленка, Ф. Л. Зайцева, М. І. Єрофєєва, А. О. Смєхова, О. В. Григорова, О. М. Орлова, Л. Я. Будікова, М. П. Александрова, Л. Н. Полякова, В. С. Ловейкіна, Н. А. Лобова, О. Б. Неженцева, Ф. Л. Зайцева, Ю. О. Ромасевича, В. В. Суглобова, Ю. В. Човнюка, Д. О. Міщука, Fang Yihai, Cho Yong K та ін.

Водночас, питанням зменшення динамічних навантажень, що діють в елементах металокопструкцій кранів, за рахунок приводних механізмів приділено ще недостатньо уваги. Тому вирішення задач оптимізації режимів руху приводних механізмів кранів, зокрема, механізму повороту стрілового крана для мінімізації динамічних навантажень в елементах металокопструкцій та приводних механізмах є актуальним завданням.

У другому розділі «Динамічна та математична модель механізму повороту баштового крана» Побудовано тримасову динамічну модель (рис. 1) механізму повороту стрілового крана, а також виведено для неї математичну модель (1) за допомогою рівнянь Лагранжа другого роду, які стали основою для проведення динамічного аналізу механізму повороту крана.

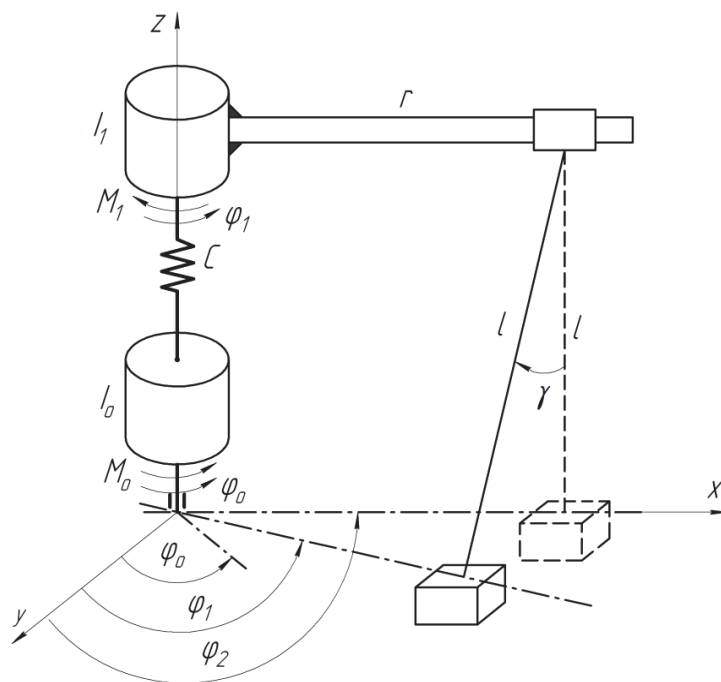


Рис. 1. Динамічна модель механізму повороту стрілового крана

В цій моделі прийнято наступні позначення:  $I_0$  – момент інерції приводного механізму, зведений до осі повороту крана;  $I_1$  – момент інерції башти та стріли, зведений до осі повороту крана;  $M_0$  – рушійний момент на валу приводного електродвигуна, який визначається за формулою Клосса і зведений до осі повороту крана;  $M_1$  – момент сил статичного опору, зведений

до осі повороту крана;  $l$  – довжина гнучкого підвісу вантажу;  $r$  – виліт вантажу;  $C$  – коефіцієнт жорсткості приводного механізму, зведений до осі повороту крана.

За узагальнені координати динамічної моделі прийнято кутові координати повороту, зведеної до осі повороту крана маси елементів приводу  $\varphi_0$ , поворотної башти зі стрілою відносно власної осі обертання  $\varphi_1$  та вантажу  $\varphi_2$ .

В цій моделі прийнято наступні припущення: підвішений вантаж подібний до вільно висячого маятника; припускаємо відцентрові коливання вантажу в порівнянні з радіальними незначними і їх дію не враховуємо; усі елементи механізму повороту вважаємо абсолютно твердими тілами, окрім передавального механізму приводу та гнучкого підвісу вантажу. Математична модель механізму повороту описується наступною системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} I_0 \ddot{\varphi}_0 = \frac{2M_{кр} \cdot u \cdot \eta}{\frac{1 - \dot{\varphi}_0 u / \omega_o}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{1 - \dot{\varphi}_0 u / \omega_o}} - C(\varphi_o - \varphi_1); \\ I_1 \ddot{\varphi}_1 = C(\varphi_o - \varphi_1) - m r^2 g(\varphi_1 - \varphi_2) / l - M_1; \\ \ddot{\varphi}_2 = g(\varphi_1 - \varphi_2) / l. \end{cases} \quad (1)$$

Тут  $M_{кр}$  – критичний момент на валу електродвигуна;  $u$  – передаточне число приводу;  $\eta$  – к. к. д. приводу;  $\omega_o$ ,  $s_{кр}$  – відповідно синхронна кутова швидкість та критичне ковзання електродвигуна;  $m$  – маса вантажу;  $g$  – прискорення вільного падіння.

Розв'язано систему диференціальних рівнянь (1) за допомогою програмного забезпечення «Wolfram Mathematica» з наступними параметрами механізму повороту:  $I_0 = 71626 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $I_1 = 4920738 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $C = 6626669 \text{ Н} \cdot \text{м/рад}$ ;  $m = 2000 \text{ кг}$ ;  $r = 40 \text{ м}$ ;  $l = 30 \text{ м}$ ;  $M_{кр} = 85 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ;  $M_1 = 49871 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ;  $u = 1355,2$ ;  $\eta = 0,86$ ;  $\omega_o = 104,67 \text{ рад/с}$ . В результаті проведених розрахунків побудовано графічні залежності (рис. 2–5).

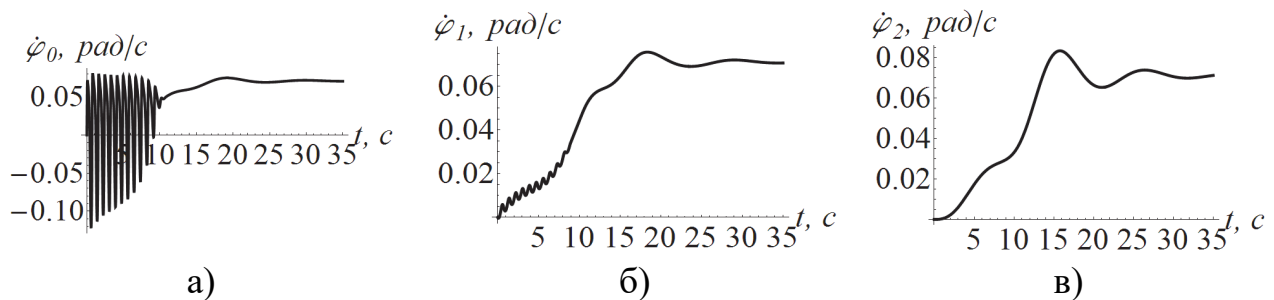


Рис. 2. Графіки зміни кутової швидкості: а) приводу; б) поворотної башти; в) вантажу



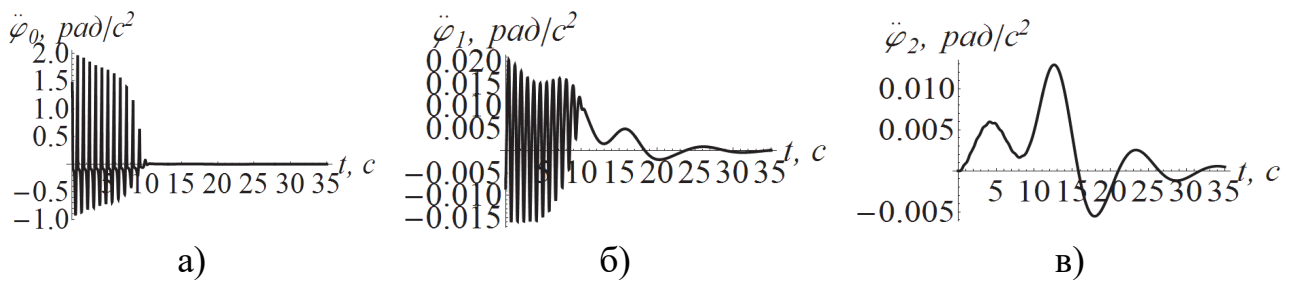


Рис. 3. Графіки зміни кутового прискорення: а) приводу; б) поворотної башти; в) вантажу

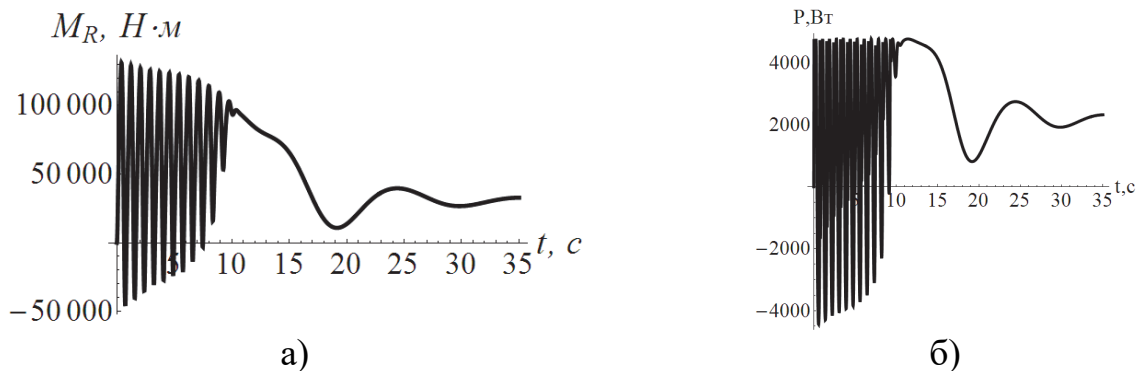


Рис. 4. Графік зміни: а) пружного моменту в приводі від часу; б) потужності приводу від часу

Проаналізувавши графічні залежності (рис. 2–5), з яких встановлено, що максимальні динамічні зусилля в пружному елементі в 4,3 раза перевищують номінальні навантаження, а максимальне значення потужності приводу у 2,3 раза перевищує усталене значення.

Крім того, мають місце значні коливання кінематичних, силових та енергетичних характеристик у процесі пуску механізму повороту, які є джерелом виникнення додаткових динамічних навантажень.

У третьому розділі «**Оптимізація режимів повороту вантажу баштовим краном**» на основі побудованої математичної моделі руху стрілового крана (1) проведено оптимізацію перехідних режимів пуску за критерієм середньоквадратичного значення пружного моменту в приводі. Встановлено, що задачу зменшення коливань вантажу на гнучкому підвісі доцільно вирішувати шляхом варіаційного числення. Обраний критерій оптимізації режиму руху механізму повороту зменшує динамічні навантаження в приводі та конструкції за рахунок плавного прикладання пускового моменту при перехідних режимах руху.

Оптимізовано режим повороту стрілового крана за критерієм середньоквадратичного значення швидкості зміни пружного моменту в приводному механізмі, оскільки саме цей момент і його швидкість зміни значною мірою визначають динамічні навантаження:

$$\dot{M}_{олк} = \left[ \frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} \dot{M}_{ол}^2 dt \right]^{1/2} \rightarrow \min; \quad (2)$$

де  $t$  – час;  $t_1$  – тривалість перехідного процесу пуску.

В результаті мінімізації критерію (2), отримано наступні графічні залежності (рис. 6–10).

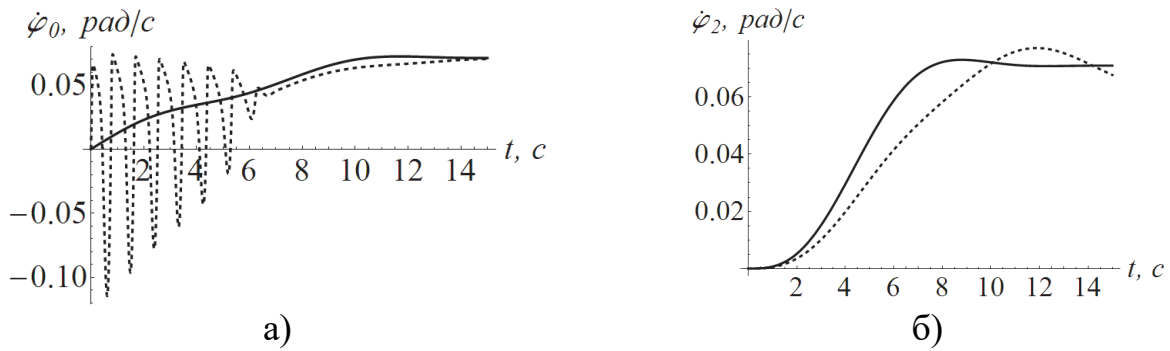


Рис. 6. Залежності зміни кутових швидкостей: а) ротора двигуна; б) вантажу при ручному (- - -) та оптимальному (—) керуванні

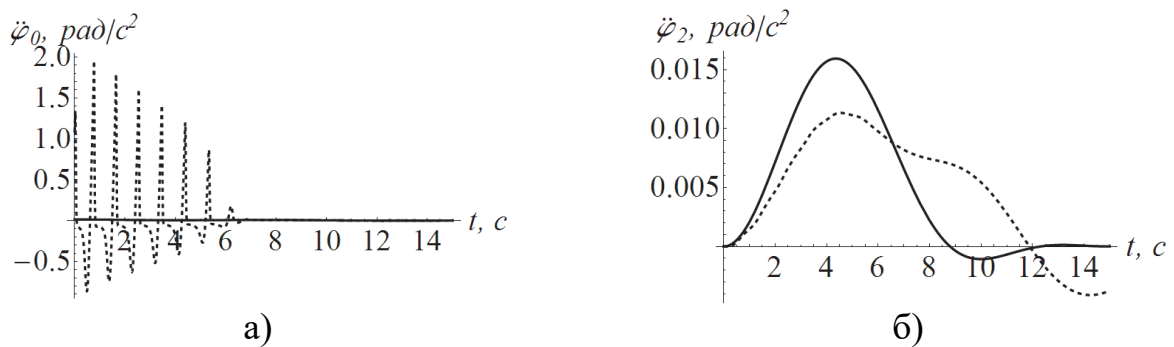


Рис. 7. Залежності зміни кутових прискорень: а) ротора двигуна; б) вантажу при ручному (- - -) та оптимальному (—) керуванні

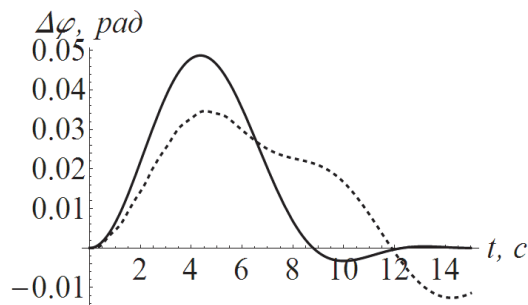


Рис. 8. Відхилення гнучкого підвісу вантажу від вертикалі при ручному (- - -) та оптимальному (—) керуванні

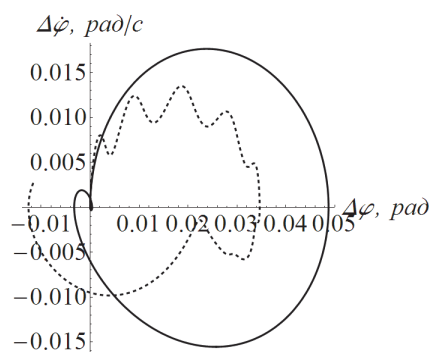


Рис. 9. Плоский фазовий портрет при ручному (- - -) та оптимальному (—) керуванні

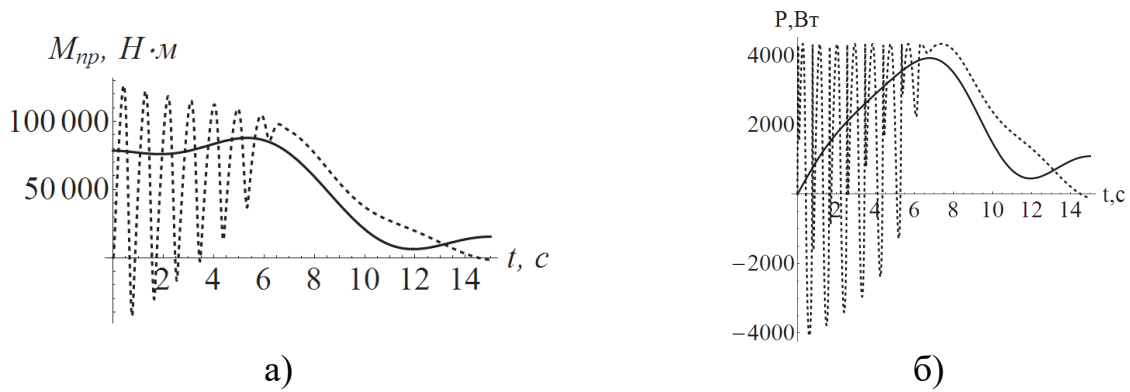


Рис. 10. Залежності зміни: а) пружного моменту в приводі; б) потужності при ручному (---) та оптимальному (—) керуванні

Оптимальне керування приводним механізмом в порівнянні з ручним керуванням дало можливість зменшити максимальні значення: кутових швидкостей ротора двигуна на 62 % та вантажу на 8 %; кутових прискорень поворотної частини на 23 % та відхилення вантажу на 31 %; моменту на валу електродвигуна на 11 % і в приводному механізмі на 40 %; потужності приводу на 6 %. Спостерігається значне зменшення кутового прискорення ротора електродвигуна при оптимальному керуванні. При оптимальному керуванні деякі параметри незначно зросли, але всі вони характеризуються плавним виходом на усталену швидкість, чого не спостерігається при ручному керуванні. Отже, головною особливістю оптимального керування рухом механізму повороту баштового крана є те, що усі характеристики руху мають плавний характер зміни, на відміну від ручного керування, де спостерігаються високо- та низькочастотні коливання елементів механізму повороту.

Оптимізовано також режим руху в процесі пуску за інтегральним динамічним критерієм середньоквадратичного значення пришвидження зміни пружного моменту в приводному механізмі:

$$\ddot{M}_{01ck} = \left[ \frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} \ddot{M}_{01}^2 dt \right]^{1/2}, \quad \ddot{M}_{01ck} = \left[ \frac{1}{t_1} \left( I_1 \frac{l}{g} \right)^2 \int_0^{t_1} \left( \ddot{\varphi}_2 + k^2 \varphi_2 \right)^2 dt \right]^{1/2} \rightarrow \min \quad (3)$$

Результати такої оптимізації наведено на рис. 11–15.

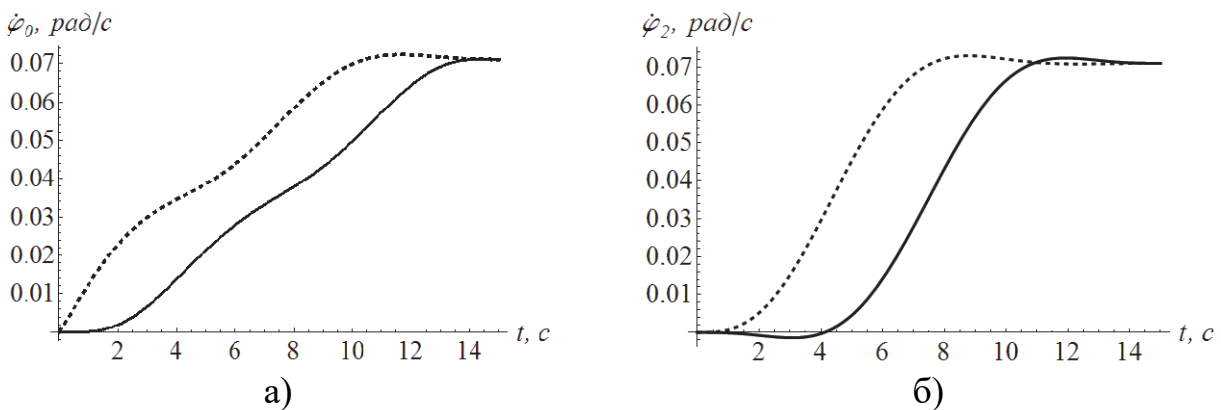


Рис. 11. Залежності зміни кутових швидкостей: а) ротора двигуна; б) вантажу при оптимальному 1 (---) та оптимальному 2 (—) керуванні

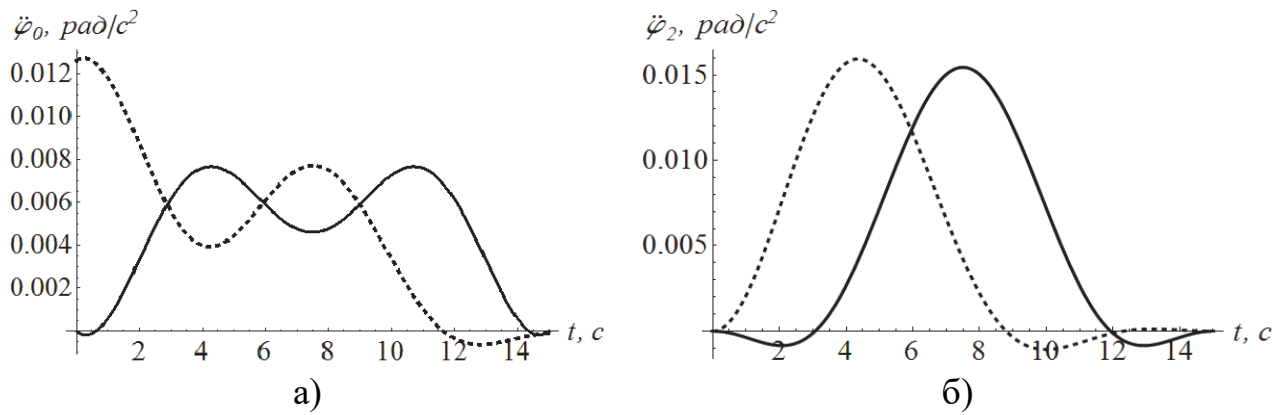


Рис. 12. Залежності зміни кутових прискорень: а) ротора двигуна; б) вантажу при оптимальному 1 (---) та оптимальному 2 (—) керуванні

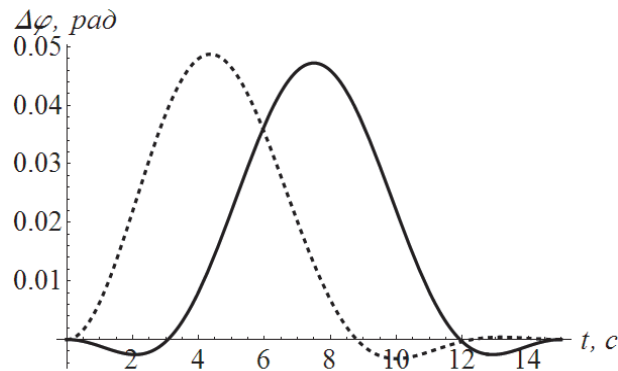


Рис. 13. Відхилення гнучкого підвісу вантажу від вертикалі при оптимальному 1 (---) та оптимальному 2 (—) керуванні

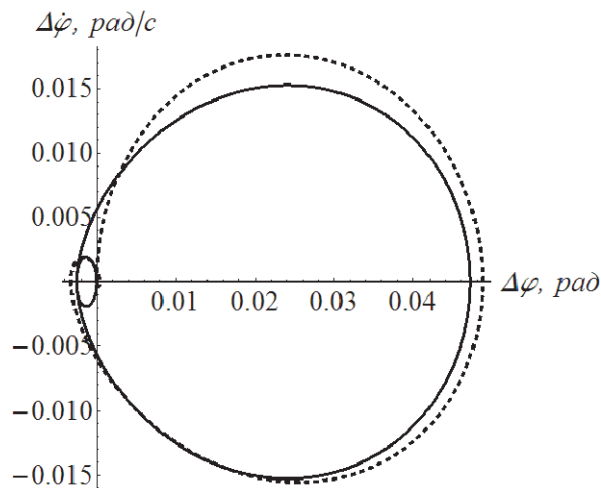


Рис. 14. Плоский фазовий портрет при оптимальному 1 (---) та оптимальному 2 (—) керуванні

Оптимальний режим 2 в порівнянні з режимом 1 дав можливість зменшити показники середньоквадратичних значень швидкостей ротора двигуна на 26 %, поворотної частини крана на 25 % та вантажу на 23 %, а кутових пришвидшень ротора двигуна та відхилення вантажу на 20 %. При цьому відхилення середньоквадратичних значень моментів на валу електродвигуна та приводному механізмі, а також потужності приводу

є незначними і складають відповідно 1,3 %, 1,2 та 1,6 %. Проведена оптимізація дозволила усунути коливання в елементах приводу та вантажу на гнучкому підвісі, а також значно зменшити величину навантажень.

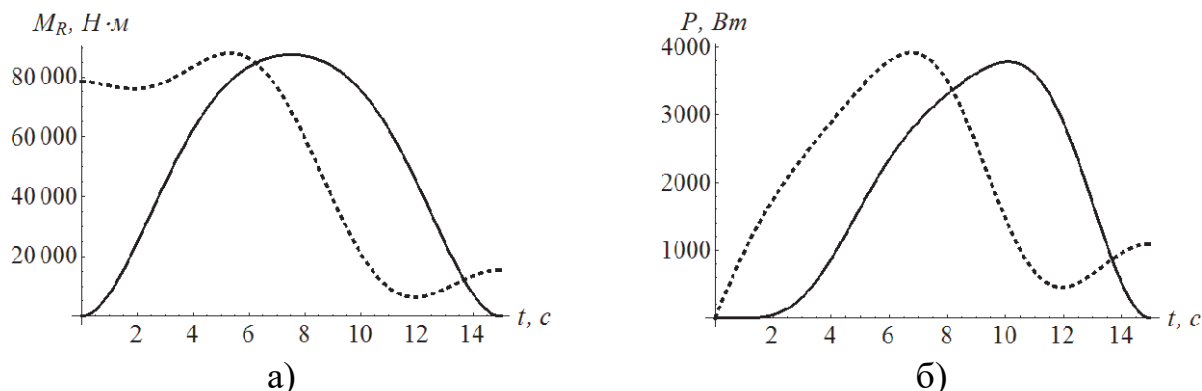


Рис. 15. Залежності зміни: а) пружного моменту в приводі; б) потужності при оптимальному 1 (---) та оптимальному 2 (—) керуванні

Обґрунтовано комплексний інтегральний динамічний критерій оптимізації режиму повороту крана, який представлено у вигляді нелінійного інтегрального функціоналу

$$K = \left\{ \frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} \left[ \delta \left( \frac{M_{01}}{M_n} \right)^2 + (1-\delta) \left( \frac{\dot{M}_{01}}{M_n} t_1 \right)^2 \right] dt \right\}^{1/2}, \quad (4)$$

де  $t$  – час;  $t_1$  – тривалість перехідного процесу (пуску, гальмування);  $M_{01}, \dot{M}_{01}$  – відповідно пружний момент в приводному механізмі та швидкість його зміни в часі зведені до вісі повороту крана;  $M_n$  – номінальний момент на валу приводного двигуна, зведений до вісі повороту крана;  $\delta$  – безрозмірний ваговий коефіцієнт, який враховує долю пружного моменту і може змінюватися від 0 до 1. Після ряду перетворень (4) має вигляд:

$$K = \left\{ \left\{ \frac{1}{M_n^2 t_1} \int_0^{t_1} \left[ \delta \left[ I_1 \frac{l}{g} \ddot{\varphi}_2 + (I_1 + m r^2) \ddot{\phi}_2 \right]^2 + (1-\delta) \left[ I_1 \frac{l}{g} \dot{\varphi}_2 + (I_1 + m r^2) \dot{\phi}_2 \right]^2 \right] dt \right\} \right\}^{1/2}. \quad (5)$$

Розв'язано нелінійну оптимізаційну задачу режиму повороту стрілового крана шляхом мінімізації інтегрального функціоналу (5). Для розв'язування крайової задачі мінімізації функціоналу використано наближений метод, а саме модифікований авторами метод «бджолиного рою», який дозволяє здійснювати оптимізацію режимів руху нелінійних механічних систем. Результати оптимізації наведено на рис. 16–18.

Отриманий оптимальний режим повороту стрілової системи крана дозволив до мінімуму звести динамічні навантаження в приводному механізмі і металоконструкції крана та усунути коливання вантажу на гнучкому підвісі під час проходження перехідного процесу, що дає можливість підвищити продуктивність та надійність роботи крана в цілому.

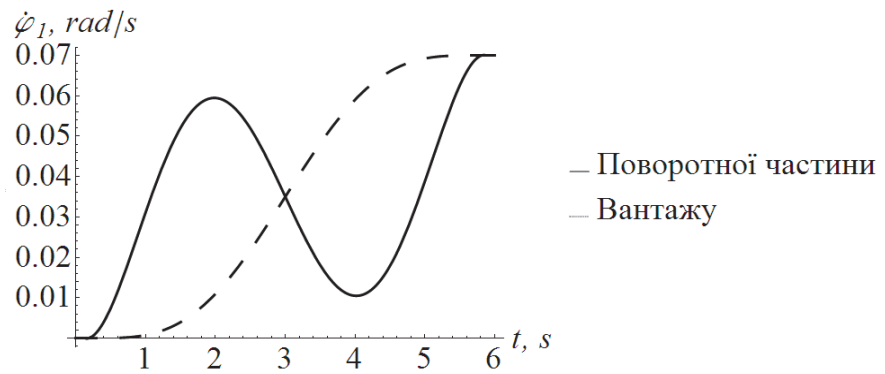


Рис. 16. Залежності зміни кутових швидкостей

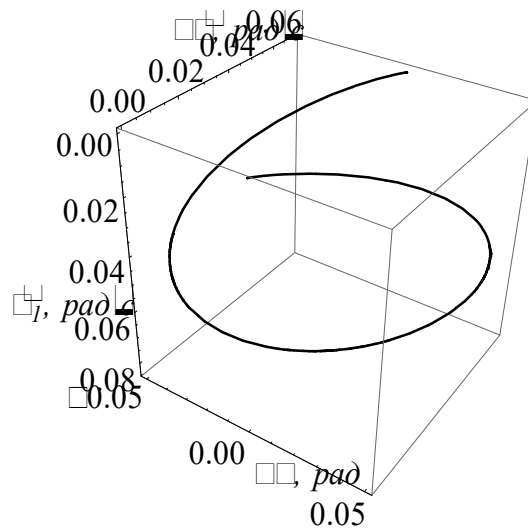


Рис. 17. Об'ємний фазовий портрет

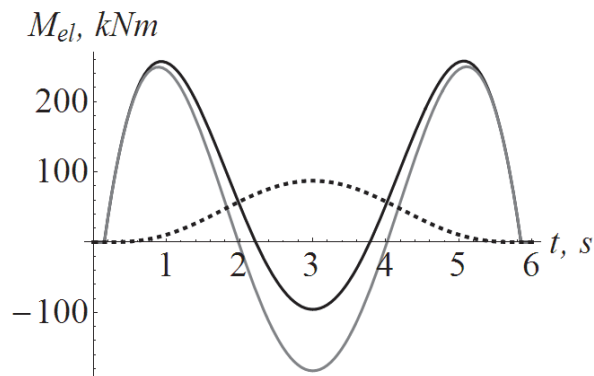


Рис. 18. Залежності зміни моментів: момент в колоні, чорна (—); момент спричинений інерційними зусиллями (- - -); момент спричинений маятниковими коливаннями вантажу на гнучкому підвісі, сіра (—)

У четвертому розділі «Програма і методика проведення експериментальних досліджень» викладено програму та методику експериментальних досліджень механізму повороту стрілового крана. За теорією подібності розроблено фізичну модель механізму повороту стрілового крана. Ця модель підготовлена для проведення експериментальних досліджень динаміки руху механізму повороту. При проведенні експериментальних

досліджень на лабораторній установці підібрано необхідне вимірювально-реєструюче обладнання, схему збору даних з якого наведено на рис. 19. На рис. 20 представлено загальний вигляд установки для проведення досліджень механізму повороту крана.

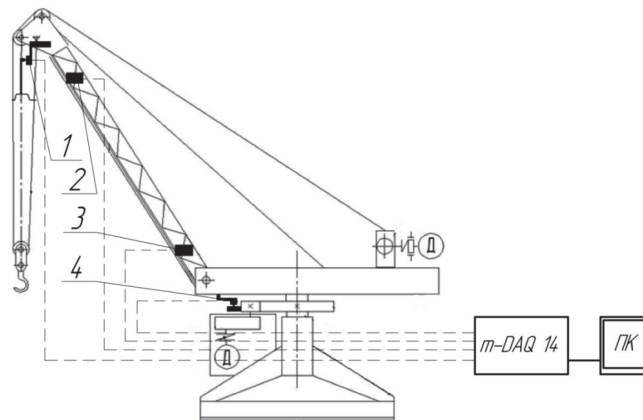


Рис. 19. Схема розташування датчиків для дослідження механізму повороту стрілового (баштового) крана: 1 – датчик для вимірювання амплітуди кутового відхилення гнучкого підвісу та вантажу; 2, 3 – датчик прискорення стрілової системи; 4 – датчик визначення швидкості поворотної частини крана



Рис. 20. Загальний вигляд установки для дослідження руху механізму повороту стрілового (баштового) крана з закріпленими датчиками

Для вимірювання амплітуди кутового відхилення гнучкого підвісу з вантажем від вертикалі використано кутовий енкодер Megatron-Impulsgeber MOL40 6 3600 – BZ N. Енкодер приєднується до оголовка стріли за допомогою плеча (штанги), яке кріпиться до енкодера за допомогою муфти, сприймає кутові відхилення канату та вантажу під час пуску механізму повороту стрілового крана (рис. 21). Для визначення прискорення вібрацій в стріловій системі баштового крана під час роботи механізму повороту у горизонтальній площині використано акселерометр MMA7260QT. Акселерометр розміщений у корпусі, який кріпиться безпосередньо до стріли крана. При цьому один датчик знаходиться на кінці стріли (рис. 21), а інший на її початку (рис. 22).





Рис. 21. Кутовий енкодер Megatron-Impulsgeber MOL40 6 3600 – BZ N та акселерометр MMA7260QT



Рис. 22. Акселерометр MMA7260QT

Для визначення швидкості поворотної частини стрілового крана під час роботи механізму повороту також використано інкрементальний енкодер Megatron-Impulsgeber MOL40 6 3600 – BZ N, який за допомогою шестерні, що знаходиться на валу енкодера, сприймає оберти, які виникають в поворотній частині під час пуску та роботи механізму повороту стрілового крана (рис. 23).



Для керування приводом механізму повороту використовувався частотний перетворювач. Для збору даних використано наступне реєструюче



обладнання: аналого-цифровий перетворювач m-DAQ 14 та комп'ютер зі встановленим на нього програмним забезпеченням. Аналого-цифровий перетворювач m-DAQ 14 підключається до комп'ютера за допомогою USB-порту і тим самим забезпечує збір даних з вимірювального обладнання, котрі поступають з датчиків у вигляді аналогових електричних сигналів та записуються і зберігаються у файлі, розширення якого «.txt». Під час збору даних для реєструючого обладнання використано стабілізований блок живлення з малим рівнем пульсацій – Hyelec HUA YI ELECTRONICS DC POWER SUPPLY HY3003M-3 (рис. 24).

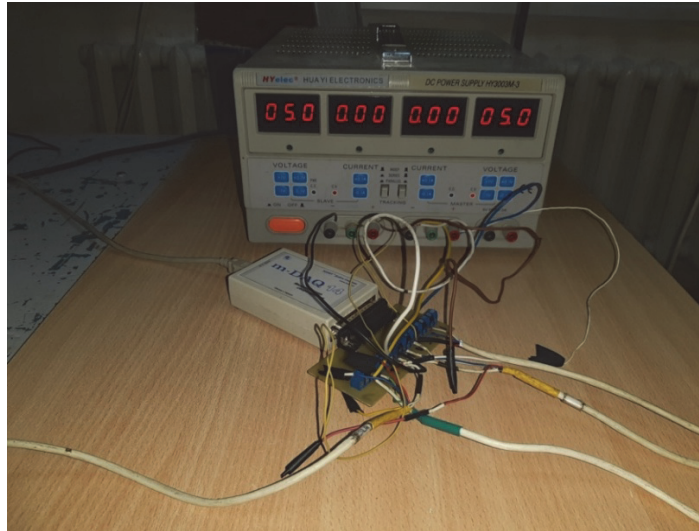


Рис. 24. Аналого-цифровий перетворювач m-DAQ 14 та блок живлення

Для реалізації оптимальних режимів руху механізму повороту розроблено комп'ютерну програму «Optimal control of the jib crane turning mechanism» (рис. 25).

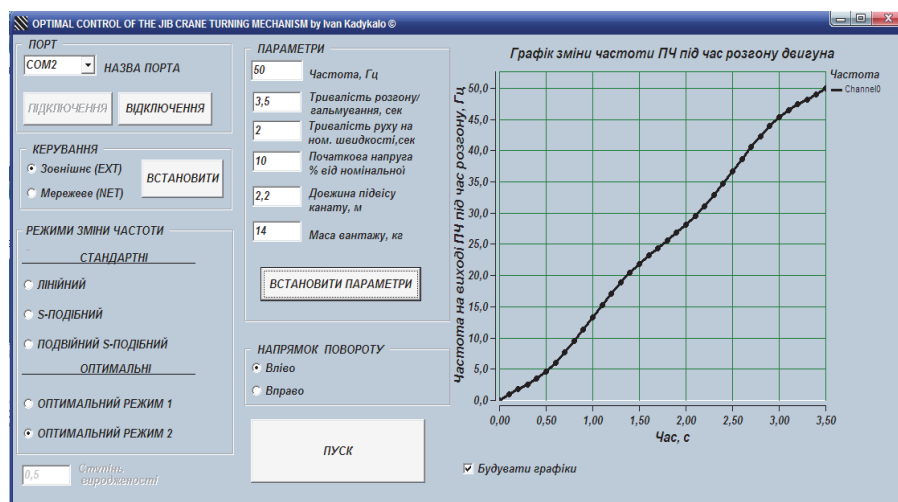


Рис. 25. Програма «Optimal control of the jib crane turning mechanism» для реалізації керування приводом механізму повороту стрілового крана

Розроблена програма дозволяє змінювати швидкість обертання приводного двигуна за допомогою перетворювача частоти (ПЧ) відповідно до отриманих оптимальних режимів руху.

У п'ятому розділі «**Результати експериментальних досліджень роботи механізму повороту баштового крана та економічна ефективність його впровадження**» наведено обробку отриманих експериментальних даних, яка проводилася за допомогою програми Wolfram Mathematica. В результаті чого отримано графічні залежності коливань відхилення вантажного канату від вертикалі та кутової швидкості повороту крана. Графічні залежності кутової швидкості повороту крана зображено на рис. 26 та відхилень гнучкого підвісу вантажу від вертикалі на рис. 27.

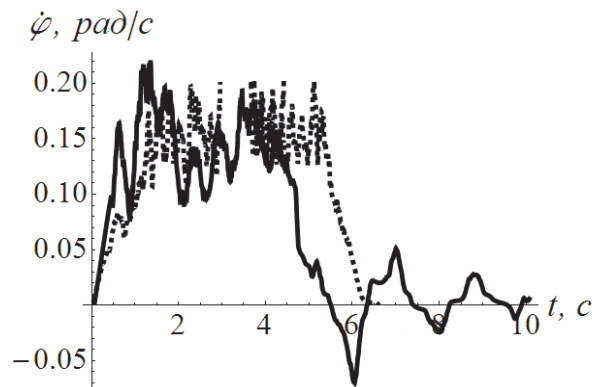


Рис. 26. Графік кутової швидкості повороту крана при некерованому (—) та оптимальному (- - -) керуванні

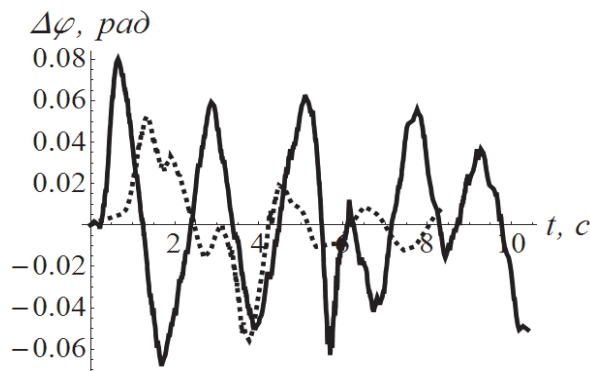


Рис. 27. Графік відхилень підвісу вантажу від вертикалі при некерованому (—) та оптимальному (- - -) керуванні

Проведено порівняння відхилень гнучкого підвісу вантажу від вертикалі та кутової швидкості повороту стрілового крана, отриманих за допомогою експериментальних досліджень на лабораторній установці при некерованому (суцільна лінія) та оптимальному керуванні (штрихова лінія).

З графічних залежностей (рис. 26) видно, що швидкість механізму повороту при некерованому керуванні має коливальний характер, який різко зростає до максимального значення 0,22 рад/с на початку руху та продовжує коливатися протягом усталеного руху та після зупинки. При оптимальному керуванні швидкість виходить на усталений режим плавніше і на початку руху

досягає максимального значення 0,20 рад/с, після зупинки коливання відсутні, а максимальна амплітуда на 9,1 % менша в порівнянні з ручним керуванням.

З графічних залежностей (рис. 27) видно, що гнучкий підвіс вантажу значно відхиляється від вертикалі та має коливальний характер. Ці коливання мають значну амплітуду в процесі пуску, яка досягає максимального значення в 0,083 рад при некерованому керуванні та продовжуються на всьому проміжку роботи механізму повороту стрілового крана і не затухають після гальмування механізму повороту крана. При оптимальному керуванні гнучкий підвіс вантажу відхиляється до 0,052 рад за рахунок того, що стріла почала рухатися, а вантаж ще ні, і коли вантаж починає рухатися виникає відхилення від вертикалі, аналогічна ситуація спостерігається під час гальмування, проте після процесу гальмування коливання вантажу відсутні. Відзначимо, що максимальна амплітуда коливань вантажу на гнучкому підвісі при оптимальному керуванні на 37,4 % менша, ніж при ручному керуванні.

На (рис. 28) зображено розроблену в дисертації схему керування механізмом повороту стрілового крана. На цій схемі 1 – мікрокомп'ютер з програмним забезпеченням для керування рухом механізму повороту стрілового крана, що наведено на рис. 25; 2 – частотний перетворювач для керування приводом механізму повороту за рахунок зміни швидкості обертання приводних двигунів; 3 – механізм повороту стрілового крана; 4 – вантаж. Представлена схема дозволяє реалізувати оптимальні режими пуску та гальмування механізму повороту стрілового крана.

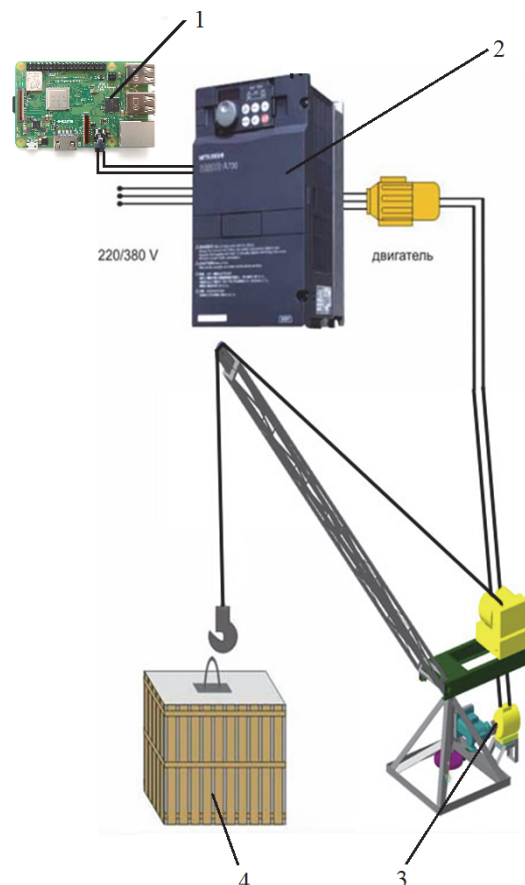


Рис. 28. Схема керування механізмом повороту стрілового крана

Розраховано економічний ефект від запровадження розробленої системи керування приводом механізму повороту стріловим краном. Розрахунок економічного ефекту включав зменшення витрат електроенергії в приводному двигуні механізму повороту, що дає можливість зменшити витрати електроенергії на 21,7 % на один кран.

## ВИСНОВКИ

У дисертації наведено дослідження, що мають за мету підвищення ефективності роботи механізму повороту стрілових за рахунок зменшення динамічних навантажень у металоконструкції та приводному механізмі під час роботи механізму повороту стрілового крана шляхом оптимізації перехідних режимів руху.

1. Аналіз літературних джерел показав, що дослідженнями динаміки роботи механізму повороту стрілового крана займаються як в Україні, так і закордоном. Водночас, обґрунтуванню перехідних процесів під час роботи механізму повороту вантажопідйомних кранів приділено недостатньо уваги.

2. Побудовано тримасову динамічну модель механізму повороту стрілового крана, з якої виведено математичну модель, що стала основою для проведення динамічного аналізу та оптимізації механізму повороту крана. За допомогою програмного забезпечення «Wolfram Mathematica» розв'язано систему диференціальних рівнянь руху механізму повороту, з якої встановлено, що динамічні зусилля в пружному елементі приводу в 4,3 раза перевищують номінальні навантаження, а максимальне значення рушійного моменту у 2,9 раза більше за усталене значення.

3. Встановлено, що максимальні значення навантажень досягають до 150 кН·м і зароджуються на початку пуску механізму повороту стрілового крана та характеризуються значною амплітудою та частотою коливань, які затухають з часом при виході на усталений режим руху. Динамічна складова потужності приводу механізму повороту досягає 4,0 кВт і значно (в 2,3 раза) перевищує усталене значення. Ці навантаження призводять до зменшення продуктивності, надійності та швидшого виходу з ладу приводу та конструкції і є причиною аварійних ситуацій під час роботи крана.

4. Розроблено методику оптимізації режимів руху механізму повороту крана на ділянках перехідних процесів (пуск і гальмування) за одиничними та комплексними критеріями. В якості одиничних критеріїв оптимізації обрані середньоквадратичні значення динамічних навантажень в приводі механізму повороту та швидкості і пришвидшення їхньої зміни в часі. За комплексний критерій оптимізації обґрунтовано безрозмірний інтегральний критерій, який враховує дію динамічних навантажень та швидкість їхньої зміни в часі і дає можливість більш повно оцінити режим руху механізму повороту.

5. На основі розробленої математичної моделі руху механізму повороту стрілового крана проведено оптимізацію перехідних режимів руху за обґрунтованими критеріями. Встановлено, що задачу зменшення коливань вантажу на гнучкому підвісі доцільно вирішувати шляхом варіаційного

числення, оскільки знайдена керуюча дія на механізм повороту задовольняє крайові умови поставленої задачі руху механізму повороту і після закінчення процесу пуску коливання вантажу на гнучкому підвісі повністю усуваються, чого не спостерігається при ручному керуванні.

6. Оптимізація режиму повороту стрілового крана за одиничними інтегральними критеріями в порівнянні з ручним керуванням дала можливість зменшити максимальні значення: кутових швидкостей ротора двигуна на 62 % та вантажу на 8 %; кутових прискорень поворотної частини на 23 % та відхилення вантажу на 31 %; моменту на валу електродвигуна на 11 % і в приводному механізмі на 40 %; потужності приводу на 6 %. Така оптимізація забезпечує плавний без коливань рух механізму повороту, який дозволяє до мінімуму зменшити динамічні навантаження в приводі та елементах конструкції крана.

7. Розв'язано нелінійну оптимізаційну задачу режиму повороту стрілового крана шляхом мінімізації комплексного критерію, представленого у вигляді нелінійного інтегрального функціоналу. Для розв'язування крайової задачі мінімізації функціоналу використано наближений метод, а саме модифікований метод «бджолиного рою», який дозволяє здійснювати оптимізацію режимів руху нелінійних механічних систем. Отриманий оптимальний режим повороту стрілової системи крана дозволив до мінімуму звести динамічні навантаження в приводному механізмі і металоконструкції крана та усунути коливання вантажу на гнучкому підвісі під час проходження перехідного процесу, що дає можливість підвищити продуктивність та надійність роботи крана в цілому.

8. Для підтвердження теоретичних розрахунків підібрано вимірювально-реєструюче обладнання та проведено експериментальні дослідження динаміки механізму повороту стрілового крана при різних режимах керування. Проведено співставлення результатів досліджень, розрахованих теоретичним шляхом за допомогою розроблених моделей, з експериментами, отриманими на фізичній моделі стрілової системи, відхилення яких знаходиться в межах точності розрахунків і не перевищують 14 %. Максимальні відхилення коливань кутової швидкості механізму повороту, визначені експериментально, на 9,1 %, а відхилення гнучкого підвісу вантажу від вертикалі на 37,4 % менші при оптимальному керуванні в порівнянні з ручним керуванням.

9. Знайдені оптимальні режими повороту стрілового крана рекомендується реалізовувати за допомогою розробленої мехатронної системи керування приводним електродвигуном. Для реалізації оптимального керування запропоновано функціональну схему системи керування краном на базі мікроконтролера, яка дає змогу розраховувати масиви частоти напруги живлення електродвигунів, з використанням даних отриманих з датчиків, котрі необхідні для підстановки у синтезований закон, що описує швидкість приводу під час переміщення крана за оптимальним режимом.

10. Запровадження розробленої системи керування приводом механізму повороту дає можливість отримати зменшення енерговитрат на 21,7 % на один кран в порівнянні з існуючою системою керування.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Монографія

1. Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О., Човнюк Ю. В., **Кадикало І. О.** Динаміка й оптимізація підйомно-транспортних машин: монографія. К., 2019. 292 с. *(Здобувачем підготовлено 1–3 розділи).*

### Статті у наукових фахових виданнях України, включених до міжнародних наукометричних баз даних

2. Ловейкін В. С., Пилипака С. Ф., **Кадикало І. О.** Динамічний аналіз механізму повороту стрілового крана. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2017. Вип. 258. С. 192–202. *(Здобувачем проведено динамічний аналіз механізму повороту стрілового крана, зроблено висновки та підготовлено статтю до друку).*

3. Ловейкін В. С., Човнюк Ю. В., Діктерук М. Г., **Кадикало І. О.** Концептуальні основи динамічного аналізу. Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні. 2017. Вип. 90. С. 19–23. *(Здобувачем проведено обґрунтування концепції динамічного аналізу механізмів повороту кранів з вантажем на гнучкому підвісі, зроблено висновки та підготовлено статтю до друку).*

4. Ловейкін В. С., Човнюк Ю. В., **Кадикало І. О.** Оптимізація режимів руху механізмів обертання вантажопідйомних кранів. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2017. Вип. 262. С. 177–190. *(Здобувачем проведено оптимізацію режимів руху механізмів обертання вантажопідйомних кранів, зроблено висновки та підготовлено статтю до друку).*

5. Ловейкін В. С., **Кадикало І. О.** Оптимізація режиму пуску механізму повороту стрілового крана за критерієм середньоквадратичного значення пружного моменту в приводі. Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні. 2017. Вип. 90. С. 34–41. *(Здобувачем проведено оптимізацію режиму пуску механізму повороту стрілового крана за критерієм середньоквадратичного значення пружного моменту в приводі, зроблено висновки та підготовлено статтю до друку).*

6. Ловейкін В. С., Ловейкін Ю. В., **Кадикало І. О.** Оптимізація режиму руху механізму повороту стрілового крана за критерієм середньоквадратичного значення швидкості зміни пружного моменту в приводі. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. 2017. Вип. 275. С. 10–22. *(Здобувачем проведено оптимізацію режиму руху механізму повороту стрілового крана за критерієм середньоквадратичного значення швидкості зміни пружного моменту в приводі, зроблено висновки та підготовлено статтю до друку).*

7. Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О., **Кадикало І. О.** Обґрунтування крайових умов руху в задачі оптимізації режиму повороту стрілового крана. Підйомно-транспортна техніка. 2019. Вип. 2(61). С. 45–59. *(Здобувачем проведено обґрунтування крайових умов руху в задачі оптимізації режиму*

повороту стрілового крана, зроблено висновки та підготовлено статтю до друку).

8. Ловеїкін В. С., Ромасевич Ю. О., Ловеїкін А. В., **Кадикало І. О.** Оптимізація режиму повороту стрілового крана за критерієм середньоквадратичного значення пришвидшення зміни зусилля в приводному механізмі. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. 2019. Vol. 10. No 3. P. 5–14. *(Здобувачем проведено оптимізацію режиму повороту стрілового крана за критерієм середньоквадратичного значення пришвидшення зміни зусилля в приводному механізмі, зроблено висновки та підготовлено статтю до друку).*

#### **Стаття у науковому виданні України**

9. Ловеїкін В. С., Човнюк Ю. В., **Кадикало І. О.**, Діктерук М. Г. Використання розв'язків «кембріджських задач» про рух ланцюгів (А. Келі та Г. Букуа) у аналізі коливань канатів вантажопідйомних кранів при підйомі вантажу «з підхватом». *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів*. 2016. Вип. 10/3 (31). С. 181–187. *(Здобувачем проведено аналіз коливань канатів вантажопідйомних кранів, зроблено висновки та підготовлено статтю до друку).*

#### **Статті у наукових виданнях інших держав**

10. Loveikin V. S., Loveikin Ju. V., **Kadykalo I. O.** Analysis of Modes of Motion of Rotation Mechanism of Jib Crane. *ТЕКА. An International Quarterly Journal on Motorization, Vehicle Operation, Energy Efficiency and Mechanical Engineering*. 2018. Vol. 18. No 1. P. 15–25. *(Здобувачем проведено порівняння оптимального і ручного керування механізму повороту стрілового крана, зроблено висновки та підготовлено статтю до друку).*

11. Loveikin Viatcheslav, Romasevych Yuriy, **Kadykalo Ivan**, Liashko Anastasia. Optimization of the swinging mode of the boom crane upon a complex integral criterion. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2019. Vol. 49. P. 285–296. *(Здобувачем проведено оптимізацію режиму повороту стрілового крана за комплексним інтегральним критерієм, зроблено висновки та підготовлено статтю до друку).*

#### **Патенти України на корисну модель**

12. Ловеїкін В. С., **Кадикало І. О.**, Патент на корисну модель № 131788 Україна, МПК В66С 23/84. Спосіб керування рухом механізму повороту баштового крана. Заявник та власник Національний університет біоресурсів і природокористування України. № u201809028; заявлено 30.08.2018; опубліковано 25.01.2019; Бюл. № 2/2019. *(Здобувачем удосконалено спосіб керування механізмом повороту баштового крана)*

13. Ловеїкін В. С., **Кадикало І. О.**, Патент на корисну модель № 138371 Україна, МПК В66С 23/84. Спосіб керування рухом механізму повороту стрілового крана. заявник та власник Національний університет біоресурсів

і природокористування України. № u201905225; заявлено 17.05.2019; опубліковано 25.11.2019; Бюл. № 22/2019. *(Здобувачем удосконалено спосіб керування механізмом повороту стрілового крана).*

### Тези наукових доповідей

14. Ловейкін В. С., **Кадикало І. О.** Визначення оптимальних законів руху механізму повороту стрілового крана. Сучасні проблеми землеробської механіки: XVI Міжнародна наукова конференція, м. Київ, 17–19 жовтня 2015 року: тези доповіді. К., 2015. С. 51–54. *(Здобувачем вивчено питання аналізу та оптимізації механізму повороту на основі двохмасової моделі).*

15. Ловейкін В. С., **Кадикало І. О.** Морфологічний аналіз привода та оптимізація перехідних режимів руху механізму повороту баштового крана. Інженерія систем природокористування: I Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 11 листопада 2015 року: тези доповіді. К., 2015. С. 56–58. *(Здобувачем вивчено питання морфологічного аналізу привода та оптимізація перехідних режимів руху механізму повороту баштового крана на основі двохмасової моделі).*

16. Ловейкін В. С., **Кадикало І. О.** Динамічний аналіз перехідних процесів механізму повороту стрілового крана. Сучасні технології виробництва зернових культур 2016: Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 12 лютого 2016 року: тези доповіді. К., 2016. С. 68–70. *(Здобувачем вивчено питання динамічного аналізу перехідних процесів механізму повороту стрілового крана на основі двохмасової моделі).*

17. Кадикало І. О. Аналіз коливань вантажу при зміні вильоту та повороту стрілового крана. Обуховські читання: XI Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 1 березня 2016 року: тези доповіді. К., 2016. С. 62–64.

18. Ловейкін В. С., Човнюк Ю. В., **Кадикало І. О.** Оптимізація режимів руху механізмів обертання вантажопідіймальних кранів. Крамаровські читання: IV Міжнародна науково-технічна конференція, м. Київ, 16–17 лютого 2017 року: тези доповіді. К., 2017. С. 83–84. *(Здобувачем вивчено питання оптимізації режимів руху механізмів обертання вантажопідіймальних кранів)*

19. Ловейкін В. С., Човнюк Ю. В., **Кадикало І. О.** Оптимізація режимів руху механізму обертання вантажопідіймних кранів при стопорінні та різкому гальмуванні. Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування: конструювання та дизайн: XVII Міжнародна конференція науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів, м. Київ, 29–30 березня 2017 року: тези доповіді. К., 2017. С. 8–9. *(Здобувачем вивчено питання оптимізації режимів руху механізмів обертання вантажопідіймальних кранів при стопорінні та різкому гальмуванні).*

20. Кадикало І. О. Оптимізація перехідних режимів механізму повороту стрілового крана. Актуальні проблеми наук про життя та природокористування: IV Міжнародна конференція молодих вчених, м. Київ, 25–27 квітня 2018 року: тези доповіді. К., 2018. Ч. 1. С. 229–231.

21. Ловейкін В. С., **Кадикало І. О.** Обґрунтування крайових умов руху в задачі оптимізації режиму повороту стрілового крана. Крамаровські читання:



V Міжнародна науково-технічна конференція, м. Київ, 22–23 лютого 2018 року: тези доповіді. К., 2018. С. 155–156. *(Здобувачем вивчено питання обґрунтування крайових умов руху при вирішенні задачі оптимізації режиму повороту стрілового крана).*

22. Ловейкін В. С., **Кадикало І. О.** Динамічний аналіз і оптимізація режиму повороту баштового крана. Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування: конструювання та дизайн: XVIII Міжнародна конференція науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів, м. Київ, 22–23 березня 2018 року: тези доповіді. К., 2018. С. 32–35. *(Здобувачем вивчено питання динамічного аналізу та оптимізації режиму повороту баштового/стрілового крана).*

23. **Кадикало І. О.**, Ловейкін В. С. Порівняльний аналіз оптимального і ручного керування механізмом повороту стрілового крана. Цілі сталого розвитку третього тисячоліття: виклики для університетів наук про життя: Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 23–25 травня 2018 року: тези доповіді. К., 2018. Т. 5. С. 169–171. *(Здобувачем вивчено питання порівняння оптимального і ручного керування механізму повороту стрілового крана).*

24. Ловейкін В. С., **Кадикало І. О.** Аналіз режимів руху механізму повороту стрілового крана. Сучасні проблеми землеробської механіки: XIX Міжнародна наукова конференція, м. Київ, 17–19 жовтня 2018 року: тези доповіді. К., 2018. С. 214–216. *(Здобувачем вивчено питання аналізу режимів руху механізму повороту стрілового крана).*

25. Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О., **Кадикало І. О.** Оптимізація режиму повороту стрілового крана за комплексним інтегральним критерієм. Крамаровські читання: VI Міжнародна науково-технічна конференція, м. Київ, 21–22 лютого 2019 року: тези доповіді. К., 2019. С. 63–65. *(Здобувачем вивчено питання оптимізації режиму повороту стрілового крана за комплексним інтегральним критерієм).*

26. Ловейкін В. С., **Кадикало І. О.** Вимірювально-реєструюче обладнання для досліджень динаміки механізму повороту стрілового крана. Обуховські читання: XIV Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 9 березня 2019 року: тези доповіді. К., 2019. С. 68–69. *(Здобувачем вивчено питання підбору та розташування вимірювально-реєструючого обладнання для досліджень динаміки механізму повороту стрілового крана).*

27. Ловейкін В. С., **Кадикало І. О.** Лабораторні експериментальні дослідження динаміки механізму повороту баштового крана. Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування: конструювання та дизайн: XIX Міжнародна конференція науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів, м. Київ, 20–22 березня 2019 року: тези доповіді. К., 2019. С. 105–107. *(Здобувачем вивчено питання дослідження динаміки руху механізму повороту баштового/стрілового крана на лабораторній установці).*

28. Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О., **Кадикало І. О.** Дослідження динаміки руху механізму повороту стрілового крана. Сучасні проблеми

землеробської механіки: XX Міжнародна наукова конференція, м. Київ, 17–19 жовтня 2019 року: тези доповіді. К., 2019. С. 127–128. *(Здобувачем вивчено питання підготовки до експериментального дослідження динаміки руху механізму повороту стрілового крана).*

29. Ловейкін В. С., **Кадикало І. О.** Вибір критеріїв подібності для фізичної моделі механізму повороту стрілового крана. Агроінженерія: сучасні проблеми та перспективи розвитку: II Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 7–8 листопада 2019 року: тези доповіді. К., 2019. С. 215–218. *(Здобувачем вивчено питання вибору критеріїв подібності для фізичної моделі механізму повороту стрілового крана).*

30. Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О., **Кадикало І. О.** Експериментальні дослідження відхилення вантажу під час роботи механізму повороту баштового крана. Крамаровські читання: VII Міжнародна науково-технічна, м. Київ, 20–21 лютого 2020 року: тези доповіді. К., 2020. С. 245–246. *(Здобувачем вивчено питання експериментальних досліджень відхилення вантажу під час роботи механізму повороту стрілового крана).*

31. Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О., **Кадикало І. О.**, Лендел Т. І. Експериментальні дослідження динаміки повороту стрілового крана. Обуховські читання: XV Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 10 березня 2020 року: тези доповіді. К., 2020. С. 65–69. *(Здобувачем вивчено питання експериментальних досліджень динаміки повороту стрілового крана).*

32. Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О., **Кадикало І. О.** Експериментальні дослідження динаміки руху механізму повороту стрілового крана на лабораторній установці. Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування: конструювання та дизайн: XX Міжнародна конференція науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів, м. Київ, 19–20 березня 2020 року: тези доповіді. К., 2020. С. 13–16. *(Здобувачем вивчено питання порівняння динаміки руху механізму повороту стрілового крана при теоретичних та експериментальних дослідженнях).*

## АНОТАЦІЯ

**Кадикало І. О. Оптимізація перехідних режимів руху механізму повороту стрілового крана.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.05.05 «Піднімально-транспортні машини». Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ, 2021.

У дисертації наведено дослідження, що мають за мету підвищення ефективності роботи механізму повороту стрілових за рахунок зменшення динамічних навантажень у металоконструкції та приводному механізмі під час роботи механізму повороту стрілового крана шляхом оптимізації перехідних режимів руху. Проведено динамічний аналіз роботи механізму повороту стрілового крана. Встановлено основні причини виникнення динамічних

навантажень, які виникають в металоконструкції та приводі механізму повороту стрілового крана. Оптимізовано перехідний процес пуску механізму повороту стрілового крана за різними оптимізаційними критеріями та проведено аналіз теоретичного дослідження оптимального керування. Розроблено систему керування приводом механізму повороту стрілового крана, яка забезпечує реалізацію оптимального керування. Для підтвердження теоретичних розрахунків підібрано вимірювально-реєструюче обладнання та проведено експериментальні дослідження динаміки механізму повороту стрілового крана при різних режимах керування. На основі результатів досліджень запропоновано рекомендації щодо розроблення системи керування механізмом повороту, використання якої дає змогу звести динамічні навантаження на металоконструкцію та приводний механізм, а також коливання вантажу на гнучкому підвісі під час роботи механізму повороту крана до мінімуму.

**Ключові слова:** стріловий кран, механізм повороту, коливання вантажу, критерій, оптимізація, динамічний аналіз, система керування.

## АННОТАЦИЯ

**Кадыкало И. А. Оптимизация переходных режимов движения механизма поворота стрелового крана.** – Квалификационная научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.05 «Подъемно-транспортные машины». Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины. Киев, 2021.

В диссертации приведены исследования, имеющие целью повышение эффективности работы стреловых кранов за счет уменьшения динамических нагрузок в металлоконструкции и приводном механизме при работе механизма поворота стрелового крана путем оптимизации переходных режимов движения.

Определены динамические нагрузки в элементах привода механизма поворота стрелового крана. Приведена динамическая модель механизма поворота стрелового крана и система дифференциальных уравнений, полученной с помощью уравнений Лагранжа второго рода и описывает движение механизма поворота с грузом. Установлено, что во время работы механизма поворота стрелового крана присутствуют динамические нагрузки как в приводе, так и в несущей конструкции, которые передаются на груз и приводят к его раскачиванию. Раскачивание груза – это нежелательный процесс, который ухудшает работу крановщика, повышает время и уменьшает точность позиционирования, снижает надежность и может привести к аварийной ситуации.

Проведена оптимизация по критерию среднеквадратического значения скорости изменения упругого момента в приводном механизме. Критерий оптимизации представлен в виде интегрального функционала, отражает нежелательные свойства системы динамические нагрузки в приводном механизме, поэтому его значение сводилось к минимуму. Решена задача

оптимизации режима поворота стрелового крана по критерию среднеквадратического значения ускорения изменения усилия в приводном механизме. Полученные законы движения по критерию среднеквадратического значения ускорения изменения усилия в приводном механизме (режим 2) имеют значительные преимущества по сравнению с законами движения по критерию среднеквадратического значения скорости изменения упругого момента в приводном механизме (режим 1).

Приведены результаты задачи, в которой в качестве критерия оптимизации выбран комплексный интегральный динамический критерий, который является относительным среднеквадратичным значением упругого момента в передаточном приводном механизме и скорости его изменения во времени. Поскольку критерий оптимизации является интегральным функционалом, то для его минимизации использованы методы вариационного исчисления. Решение вариационной задачи представлено в дискретном виде с использованием метода «пчелиного роя», с помощью которого найдено минимальное значение критерия оптимизации и дискретные значения кинематических, силовых и энергетических характеристик стреловой системы, которые отвечают минимуму этого критерия.

Изложена программа и методика экспериментальных исследований механизма поворота стрелового крана. Разработана система управления приводом механизма поворота стрелового крана, которая обеспечивает реализацию оптимального управления. Для подтверждения теоретических расчетов подобрано измерительно-регистрирующее оборудование и проведены экспериментальные исследования динамики механизма поворота стрелового крана при различных режимах управления. На основе результатов исследований предложены рекомендации по разработке системы управления механизмом поворота, использование которой позволяет свести динамические нагрузки на металлоконструкцию и приводной механизм, а также колебания груза на гибком подвесе при работе механизма поворота крана до минимума.

**Ключевые слова:** стреловой кран, механизм поворота, колебания груза, критерий оптимизации, динамический анализ, система управления.

## ANNOTATION

**Kadykalo I. O. Optimization of Transient Modes of Movement of Jib Crane Rotation Mechanism.** – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.05.05 «Hoisting and Transport Machines». National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Kyiv, 2021.

The dissertation presents researches aimed at increasing the efficiency of the jib turning mechanism by reducing the dynamic loads in the metal structure and the drive mechanism during the operation of the jib crane turning mechanism by optimizing the transient modes of movement. The dynamic analysis of the operation of the jib crane rotation mechanism is carried out. The main causes

of dynamic loads that occur in the metal structure and the drive mechanism of the jib crane are established. The transient process of starting the jib crane turning mechanism is optimized according to various optimization criteria and the analysis of the theoretical research of optimal control is carried out. The control system of the drive of the mechanism of turn of the jib crane which provides realization of optimum control is developed. To confirm the theoretical calculations, measuring and recording equipment was selected and experimental studies of the dynamics of the jib crane rotation mechanism under different control modes were performed. Based on the research results, recommendations are proposed for the development of a control system for the turning mechanism, the use of which allows to reduce the dynamic loads on the metal structure and the drive mechanism, as well as load oscillations on the flexible suspension during operation of the crane turning mechanism.

**Key words:** jib crane, turning mechanism, load oscillations, criterion, optimization, dynamic analysis, control system.